

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

**HANDOVER MEZI BEZDRÁTOVÝMI SÍTĚMI VANET
A LTE-A**

Květen 2015

Autor:

Bc. Michal Škulka

Vedoucí práce:

Ing. Michal Vondra, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou prací zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze 11. 5. 2015

.....

podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Michalu Vondrovi, Ph.D. za pomoc, cenné rady a odborné vedení při zpracování této diplomové práce. Dále pak děkuji rodině za podporu při studiu.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Škulka Michal**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Sítě elektronických komunikací

Název tématu: **Handover mezi bezdrátovými sítěmi VANET a LTE-A**

Pokyny pro vypracování:

Cílem diplomové práce je návrh účinné a dostatečně robustní metody predikce handoveru mezi sítěmi VANET a LTE-A. Efektivita navržené metody bude vyhodnocena a porovnána s podobnými algoritmy prostřednictvím simulací v programu MATLAB.

Seznam odborné literatury:

- [1] Sivaraj, Rajarajan, et al. "QoS-enabled group communication in integrated VANET-LTE heterogeneous wireless networks." *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2011 IEEE 7th International Conference on. IEEE, 2011.
- [2] Labiod, Houda, Nabil Tabbane, and Sami Tabbane. "FQGwS: A gateway selection algorithm in a hybrid clustered VANET LTE-advanced network: Complexity and performances." *Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 2014 International Conference on. IEEE, 2014.

Vedoucí: Ing. Michal Vondra

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



prof. Ing. Boris Šimák, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 13. 11. 2014

Anotace:

Tato diplomová práce zpracovává problematiku predikce handoveru mezi sítěmi VANET a LTE-A s využitím mapy úrovně signálů a predikce pohybu uživatele.

Cílem této práce je navržení rozhodovacího algoritmu o provedení handoveru pro snížení zátěže LTE-A sítě maximálním využitím sítí VANET. Za účelem ověření výsledků byl vytvořen simulační model v prostředí MATLAB, který představuje pohyb vozidla po silnici v prostředí heterogenní bezdrátové sítě. Během jízdy jsou prováděny vertikální handovery mezi sítěmi VANET a LTE-A.

Výsledky diplomové práce ukazují, že při použití navrženého algoritmu dochází ke zvýšení využití sítí VANET a zároveň ke snížení doby výpadků při provádění handoverů mezi sítěmi.

Klíčová slova:

Handover, ITS, LTE-A, mobilní telekomunikační sítě, predikce pohybu, VANET.

Abstract:

Main theme of this diploma thesis is prediction of handover between VANETs and LTE-A with utilization of signal levels map and user movement prediction.

This thesis proposes handover decision making algorithm to reduce LTE-A load. This goal is reached by maximal using of VANETs. For results verification, simulation model was made in MATLAB environment which represents car movement on street through heterogeneous wireless network. Vertical handovers between VANETs and LTE-A are made during ride.

Results of this thesis show that of proposed algorithm leads to increasing VANETs usage and reducing outage time during handover making between networks.

Key words:

Handover, ITS, LTE-A, Mobile telecommunication networks, movement prediction, VANET.

Obsah

Obsah.....	6
1. Úvod.....	8
2. Mobilní síť.....	9
2.1. Long Term Evolution.....	9
2.1.1. Architektura LTE.....	10
2.1.2. Bezdrátové rozhraní.....	10
2.1.3. Modulace.....	12
2.2. LTE-A.....	13
3. Bezdrátová síť pro ad-hoc komunikaci mezi vozidly.....	15
3.1. Inteligentní transportní systémy.....	15
3.2. Bezdrátový standard WAVE a síť VANET.....	17
4. Handover.....	19
4.1. Typy handoverů.....	19
4.2. Rozhodovací algoritmy pro provedení handoveru.....	22
4.2.1. Vertikální HO s preferovanou sítí (ALIVE-HO).....	22
4.2.2. Přístup a (PAHA).....	23
4.2.3. Přístup B (PAHB).....	24
4.3. Srovnání popsaných algoritmů.....	25
5. Navržená predikce handoveru mezi sítěmi VANET a LTE-A.....	26
5.1. Rozhodnutí o handoveru a prahová hodnota sítě VANET.....	26
5.2. Mapa úrovně signálů.....	28
5.3. Predikce pohybu.....	28
5.4. Predikce handoveru mezi sítěmi VANET a LTE-A.....	30

6.	Navržený pohybový model.....	32
6.1.	Prostředí modelu	32
6.2.	Dynamické vlastnosti modelu	34
6.3.	Model šíření signálu.....	36
6.4.	Výpočet CINR.....	37
6.5.	Provádění handoveru s využitím predikce pohybu	38
7.	Vyhodnocení návrhu.....	40
7.1.	Čas strávený ve VANET	40
7.2.	Doba výpadku spojení.....	42
7.2.1.	Závislost doby výpadku služby na prahové hodnotě sítě VANET.....	42
7.2.2.	Závislost doby výpadku služby na době trvání HO.....	43
7.3.	Neúspěšné HO.....	44
7.3.1.	Závislost neúspěšných HO na prahové hodnotě sítě VANET	44
7.3.2.	Závislost neúspěšných HO na době trvání HO	45
7.4.	Doba zbytečně strávená v LTE-A.....	46
7.4.1.	Závislost doby zbytečně strávené v LTE-A na prahové hodnotě sítě VANET	46
7.4.2.	Závislost doby zbytečně strávené v LTE-A na době trvání HO	47
8.	Závěr.....	49
	Použité zkratky	50
	Použitá literatura	52

1. Úvod

V posledních letech dochází k výraznému zvýšení nároků uživatelů mobilních zařízení na kvalitu a rychlost datového spojení. Avšak i přes neustálé vylepšování technologie mobilních sítí nemusí v budoucnu jejich kapacita stačit [1]. Je proto třeba najít nové způsoby, jak mobilní síť odlehčit. Jako vhodné řešení se jeví odlehčení mobilní sítě o uživatele, kteří mohou využít jiný způsob připojení, než pouze mobilní síť. Takovými uživateli mohou být například uživatelé cestující ve vozidlech, anebo přímo vozidla, která jsou již sama o sobě připojena k bezdrátové síti. V případě vozidel a uživatelů v nich cestujících je možné využít sítě krátkého dosahu, jakými jsou například sítě VANET. Hlavním úkolem sítí VANET je však sdílení informací v oblasti bezpečnosti provozu. Avšak část přenosových prostředků by mohla být využita pro přenos uživatelských dat. Tyto ušetřené přenosové prostředky pak mohou být přiděleny uživatelům, kteří tak mohou odlehčit mobilní síť.

Tato diplomová práce se zabývá prováděním handoveru mezi sítěmi VANET a LTE-A. Hlavní důraz je přitom kladen na to, aby bylo zajištěno snížení zátěže sítě LTE-A a naopak plně využity automobilové ad-hoc sítě. Současně je návrh cílen na snížení doby výpadku při provádění handoveru ze sítě VANET. Pro tento účel je využita kombinace znalosti mapy úrovní signálů a včasné provedení handoveru je zajištěno predikcí pohybu vozidla.

Práce je strukturována následovně. Ve druhé kapitole jsou představeny současné mobilní sítě reprezentované sítěmi LTE a LTE-A. Třetí kapitola se věnuje sítím pro bezdrátovou komunikaci mezi vozidly, jejich funkcím a možnostem využití. Ve čtvrté kapitole je rozebrán pojem handover, jeho typy a přehled parametrů, podle kterých může být handover proveden. Dále jsou v této kapitole představeny některé algoritmy, které rozhodují o provedení handoveru. Pátá kapitola obsahuje hlavní část diplomové práce, tedy návrh algoritmu pro efektivní provádění handoveru mezi sítěmi LTE-A a sítěmi VANET. V šesté kapitole je popsán simulační model, který byl pro potřeby práce navržen a implementován. Kromě dynamických vlastností modelu je součástí kapitoly i popis vyhodnocování navrženého řešení. V sedmé kapitole jsou popsány a vyhodnoceny výsledky simulací v závislosti na proměnných parametrech simulačního modelu. Poslední, osmá kapitola, shrnuje dosažené výsledky diplomové práce a naznačuje možné rozšíření práce.

2. Mobilní síť

Společně s rozvojem internetu a jeho oblibou stále více zařízení využívá připojení k internetu. V současné době roste popularita chytrých telefonů, jejichž využitelnost stoupá především díky řadě implementovaných senzorů. Kromě chytrých telefonů však mohou být k síti připojeny také různá zařízení nebo dokonce samostatné senzory v rámci konceptu IoT (Internet of Things). Tím roste zátěž a požadavky na mobilní síť. Proto už nestačí síť starších generací, které byly vyvíjeny pouze pro volání, a umožňovaly pouze posílání SMS (Short Message Service), ale jsou vyvíjeny síť orientované a optimalizované pro paketovou komunikaci [2].

2.1. Long Term Evolution

Ačkoliv bývá síť LTE (Long Term Evolution) často označována za síť čtvrté generace (4G), ve skutečnosti nedosahuje požadovaných parametrů a tak spadá do bezdrátových systémů třetí generace (3G), kde je nejčastěji označována jako síť 3,9G. Za první mobilní síť 4G je možné považovat až vylepšenou verzi LTE, tedy LTE-A (Long Term Evolution - Advanced). Ta již oproti standardu LTE splňuje všechny požadavky definované organizací ITU (International Telecommunication Union) na mobilní síť 4G, tedy mimo jiné umožňuje propustnost sítě v sestupném směru alespoň 1 Gb/s [3].

LTE bylo vyvinuto z předchozího systému organizace 3GPP (Third Generation Partnership Project) známého jako UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). UMTS je mobilní síť umožňující komunikaci pomocí přepojování okruhů nebo pomocí přepojování paketů. K vícenásobnému přístupu využívá UMTS kódové dělení WCDMA (Wideband Code Division for Multiple Access). Oproti tomu je LTE plně paketově orientovanou sítí a má výrazně vyšší přenosovou rychlost, nižší zpoždění a vyšší efektivitu využití frekvenčního spektra než UMTS. Propustnost sítě LTE dosahuje rychlosti až 300 Mb/s [4], což je přibližně 10 krát více než rychlost předchozích 3G systémů. Tabulka 2.1 ukazuje porovnání 3G systémů z hlediska jejich maximální teoretické přenosové rychlosti v sestupném směru.

Tabulka 2.1: Porovnání mobilních sítí 3. a 4. generace z hlediska propustnosti v sestupném směru [5].

3G	WCDMA/UMTS	384 kb/s
3G	CDMA 2000	384 kb/s
3.5G	1xEVDO (Evolution Data Optimized) Rev A, B, C	5 – 30 Mb/s
3.75G	HSDPA/HSUPA (High Speed Downlink/Uplink Packet Access)	5 – 30 Mb/s
3.9G	LTE	100 – 300 Mb/s [4]
3.9G	WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)	100 – 200 Mb/s

2.1.1. Architektura LTE

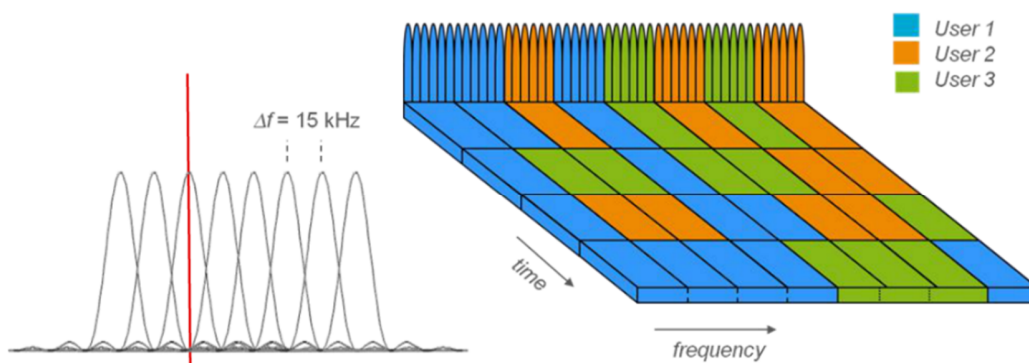
Architektura sítě LTE vychází z předchozí sítě UMTS. Označování jednotlivých prvků sítě LTE je převzato z UMTS, ale pro rozlišení se v LTE síti k názvům prvků přidává písmeno e značící evolved (česky rozvinutý). Síť LTE se skládá z přístupové sítě E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) a jádra sítě EPC (Evolved Packet Core). Přístupová síť E-UTRAN je tvořena základnovými stanicemi označovanými jako eNodeB nebo eNB, opět po vzoru sítě UMTS. Základnové stanice řídí rádiové zdroje, šifrují a vysílají data, zajišťují spojení s páteří sítě a plánují přenosy pro vzestupný i sestupný směr. Uživatel se se svým zařízením označovaným jako UE (User Equipment) připojuje k základnovým stanicím pomocí protokolu přístupové vrstvy AS (Access Stratum).

2.1.2. Bezdrátové rozhraní

Síť LTE využívá stávající pásma pro GSM (Global System for Mobile Communications), ale využívá také nová frekvenční pásma a její frekvenční spektrum je velice flexibilní, díky tomu, že využívá několik pásem kanálů šířky 1,4 MHz až 20 MHz [5]. Zároveň umožňuje využití FDD (Frequency Division Duplex) i TDD (Time Division Duplex) módu.

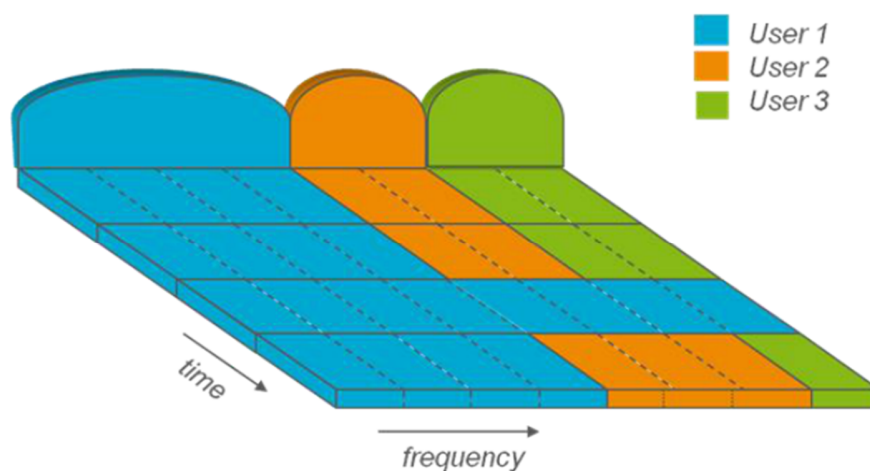
Na rozdíl od předchozích generací využívá LTE pro sestupný a vzestupný směr rozdílné přístupy. Pro sestupný směr, tedy směrem od sítě k uživateli, je v LTE využíván přístup frekvenčního dělení s ortogonálními frekvencemi OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Oproti WCDMA (využívaném u UMTS), kde je celé pásmo využíváno všemi účastníky, je OFDMA založen na velkém počtu úzkých frekvenčních pásem přidělovaných jednotlivým účastníkům. Obrázek 2.1 ukazuje frekvenční spektrum několika signálů. Signál je

přenášen ortogonálně po každých 15 kHz [5], tedy nejsilnější úroveň nosného signálu jsou v místě, kde je úroveň ostatních signálů nejslabší. Druhá část obrázku ukazuje rozložení LTE prostředků ve frekvenční a časové oblasti. To umožňuje velkou flexibilitu OFDMA, protože prostředky mohou být uživatelům přidělovány v obou oblastech – v časové i frekvenční.



Obrázek 2.1: OFDMA – Frekvenční a časové rozložení přidělovaných prostředků. Převzato z [5].

Vzestupný směr od uživatele k mobilní síti využívá předkódovanou formu OFDMA, která se nazývá SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access). Předkódování probíhá pomocí DFT (Discrete Fourier Transformation). Obrázek 2.2 zobrazuje sdružení jednotlivých nosných frekvencí do spojitých bloků, což snižuje kolísání výkonu a energetickou náročnost přenosu.

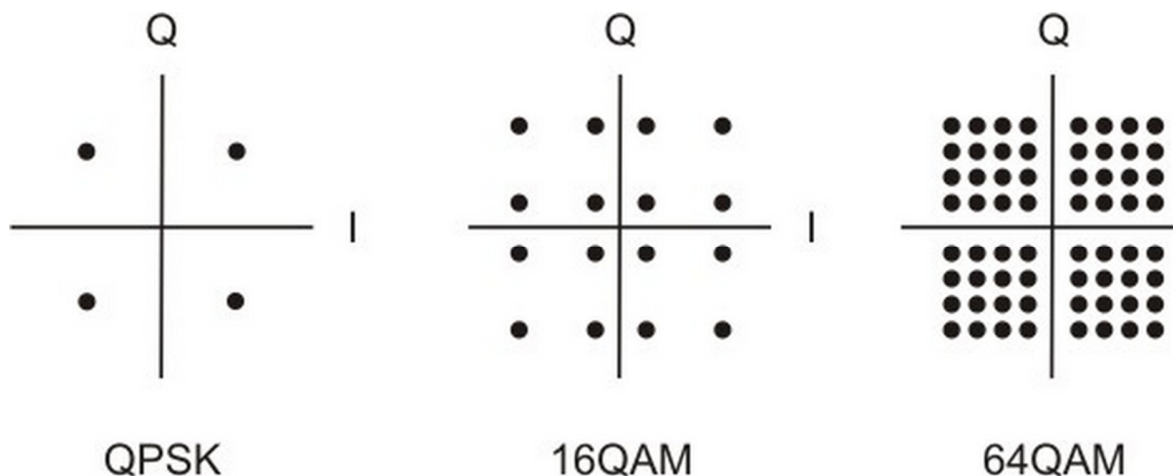


Obrázek 2.2: SC-FDMA – Frekvenční a časové rozložení přidělovaných prostředků. Převzato z [5].

Dalším rozdílem LTE oproti 3G systémům je využití technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output). MIMO se využívá pro tvarování vyzařování vysílače a prostorového dělení. To je umožněno vysíláním a přijímáním pomocí více antén. Data jsou přenášena nezávisle a kódována odděleně od ostatních antén.

2.1.3. Modulace

LTE využívá tři typy modulace a to QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying), 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) a 64QAM. Obrázek 2.3 naznačuje konstelační diagramy těchto modulací. Konstelační diagramy zobrazují vysílané symboly s jednotlivými stavy modulovaného signálu v komplexní rovině, kde vodorovná osa I se nazývá soufázovou a osa svislá Q se nazývá kvadraturní. S rostoucím počtem stavů modulace je možné předat v jednom symbolu v jednom časovém okamžiku více informací, čímž roste rychlost přenosu.



Obrázek 2.3: Konstelační diagramy modulací využívaných v LTE.

LTE využívá adaptivní modulace a kódování. To znamená, že vhodná modulace se vždy vybírá na základě kvality signálu. Podle vybrané modulace je přenášen v symbolu rozdílný počet bitů a podle kvality signálu rozdílný počet redundantních bitů.

Pokud je signál vyhodnocen jako dostatečně kvalitní, je vybrána modulace 64QAM. Díky modulaci 64QAM je přenášeno 6 bitů na symbol, prostřednictvím $2^6 = 64$ stavů. Za předpokladu dostatečně kvalitního signálu je také snížen počet přenášených redundantních bitů, protože

pravděpodobnost chyby je malá. Tím je zvýšena efektivita využití přidělených rádiových prostředků a uživatel může využívat vyšší datovou rychlost.

Pokud je kvalita signálu vyhodnocena jako nízká, je použita modulace s nižším počtem bitů na symbol, tedy například modulace QPSK s 2 bity na symbol, prostřednictvím $2^2 = 4$ stavů. a protože je kvalita signálu nízká, roste pravděpodobnost chyby. Proto je v tomto případě přenášen větší počet redundantních bitů a důraz je kladen nikoliv na rychlost přenosu, ale na spolehlivost.

V případě výběru modulace 16QAM jsou přenášeny 4 bity na jeden symbol, prostřednictvím $2^4 = 16$ stavů.

2.2. LTE-A

LTE-A (Advanced, česky pokročilý) je vylepšenou verzí LTE. LTE-A může využívat šířku pásma až 100 MHz, což je 5 krát větší šířka pásma než LTE. LTE-A dále využívá MIMO s více anténami pro vysílání i příjem, což umožňuje dosažení dalšího zvýšení propustnosti dat. LTE-A může využít v sestupném směru MIMO až 8x8 oproti tomu LTE může použít pouze maximálně MIMO 4x4. V případě LTE-A může být ve vzestupném směru využíváno MIMO až 4x4, kdežto v případě LTE není technologie MIMO ve vzestupném směru podporována vůbec.

Stejně tak LTE-A dosahuje větší efektivity využití frekvenčního spektra, a to až 30 bitů za sekundu na jeden Hz v sestupném směru a až 15 bitů za sekundu na jeden Hz ve vzestupném směru. Oproti tomu LTE dosahuje pouze 15 bitů za sekundu na 1 Hz v sestupném a 3,75 bitů za sekundu na jeden Hz ve vzestupném směru.

Díky všem těmto zlepšením může LTE-A dosáhnout teoretické přenosové rychlosti v sestupném směru až 3 Gb/s [7] oproti maximu 300 Mb/s v LTE. Ve vzestupném směru umožňuje LTE-A dosáhnout teoretické přenosové rychlosti až 1,5 Gb/s oproti 75 Mb/s ve vzestupném směru v LTE. Při porovnání s LTE se jedná v případě LTE-A o desetinásobné zvýšení rychlosti v sestupném směru a dvacetinásobné zvýšení přenosové rychlosti ve vzestupném směru.

Tabulka 2.2 porovnává vybrané základní údaje LTE a LTE-A.

Tabulka 2.2: Porovnání vybraných parametrů mezi LTE a LTE-A [4].

		LTE	LTE-A
Teoretická přenosová rychlost	Sestupný směr	300 Mb/s	3 Gb/s [7]
	Vzestupný směr	75 Mb/s	1,5 Gb/s [7]
Efektivita využití spektra [b/s/Hz]	Sestupný směr	15	30
	Vzestupný směr	3,75	15
Šířka pásma	Oba směry	do 20 MHz	do 100 MHz
MIMO (prostorové multiplexování)	Sestupný směr	až 4x4	až 8x8
	Vzestupný směr	nevyužívá	až 4x4

3. Bezdrátová síť pro ad-hoc komunikaci mezi vozidly

S rozvojem automobilového průmyslu je ve vozidlech implementováno stále více elektroniky a senzorů, které je možné využívat pro zvýšení bezpečnosti a pohodlí posádky automobilu. Další možností, jak zvýšit bezpečnost a komfort uživatelů při cestování, je umožnit mezi vozidly vzájemnou komunikaci aplikací využívajících informace ze senzorů například za účelem upozornění řidiče na možnou bezpečnostní hrozbu.

Problematice komunikace mezi takto vybavenými vozidly se věnují inteligentní transportní systémy, které jsou popsány v první části této kapitoly. V druhé části je představen bezdrátový standard WAVE (Wireless Access in the Vehicular Environment), který je využíván pro komunikaci mezi vozidly. Společně s WAVE jsou představeny ad-hoc sítě mezi vozidly VANET (Vehicular Ad Hoc Network).

3.1. Inteligentní transportní systémy

Automobily jsou v současné době vybaveny velkým množstvím senzorů. Data z těchto senzorů je možné předávat do sítě a tím zajistit například zlepšení bezpečnosti. Na tomto základě vznikly systémy ITS (Intelligent Transport Systems) umožňující vytvářet automobilové sítě, ve kterých může komunikovat velké množství ITS aplikací. Systémy ITS vznikly především za účelem zvýšení bezpečnosti a komfortu posádky automobilu.

Tyto sítě umožňují dva typy komunikace. Prvním typem je V2V (Vehicle to Vehicle) komunikace, kde komunikace probíhá mezi automobily. Druhým typem je V2I (Vehicle to Infrastructure), při kterém probíhá komunikace mezi automobilem a infrastrukturou, tedy nepohyblivým vysílačem. Komunikace typu V2V může být dále rozdělena na komunikaci přímou a nepřímou. Nepřímá komunikace znamená, že dva automobily spolu komunikují pomocí třetího. Oproti tomu přímá komunikace je situace, kdy spolu dva automobily komunikují přímo bez zapojení dalších vozidel.

Komunikace může probíhat dvěma způsoby, a to buď jednosměrně anebo obousměrně. První způsob se využívá pro informační aplikace např. varování automobilu před mimořádnou situací v dopravě. Druhý způsob se využívá pro interaktivní aplikace, jako je například GPS (Global Position System) navigace se zohledněním aktuální dopravní situace. Data při jednosměrné

komunikaci mohou být přenášena třemi způsoby [8]: unicast – data jsou přenášena pouze jedné konkrétní cílové jednotce, broadcast – data jsou přenášena všem cílovým stanicím, geocast – data jsou přenášena jen těm cílovým jednotkám, které se nachází v konkrétní oblasti.

Důležitý je také mechanismus přidělování priority jednotlivým aplikacím, podle kterého je aplikacím s vysokou citlivostí na zpoždění přidělován komunikační kanál přednostně nebo je jim přidělována větší šířka pásma v porovnání s aplikacemi, které nejsou tolik citlivé na zpoždění.

Podle [8] lze ITS aplikace rozdělit do tří základních skupin. Aplikace v první skupině mají za úkol zlepšovat dopravu z hlediska bezpečnosti, aplikace v druhé skupině se věnují efektivitě dopravy a jejímu řízení a třetí skupina aplikací se zabývá zlepšením komfortu cestujících.

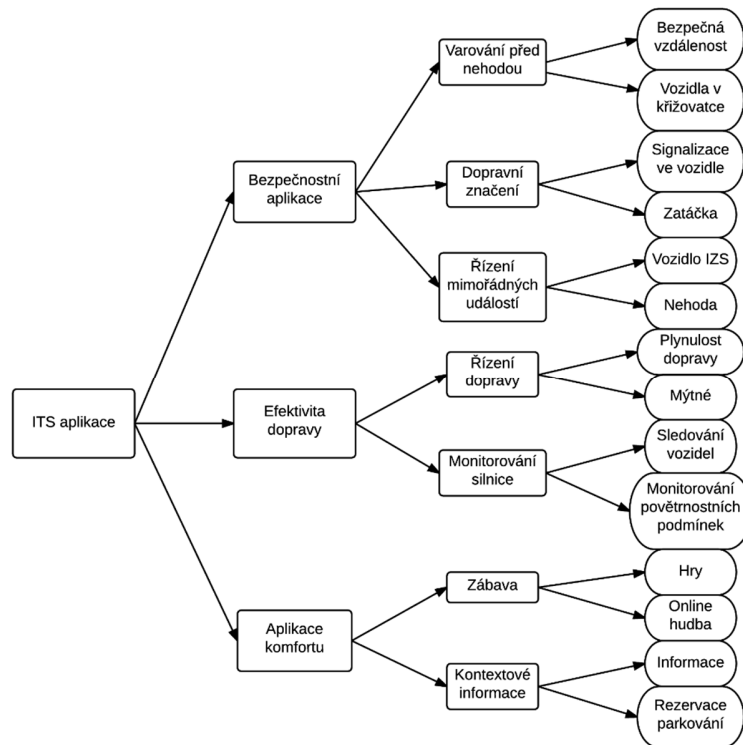
Bezpečnostní aplikace se dále dělí na aplikace, které se využívají pro varování řidiče před hrozící nehodou. Tyto aplikace využívají sledování a upozorňování na dodržování bezpečné vzdálenosti mezi vozidly a varování před blížícími se vozidly v křižovatce. Druhou skupinou bezpečnostních aplikací jsou upozornění na dopravní značení. Tyto aplikace dokážou řidiče upozornit na dopravní značení s předstihem tak, aby měl řidič delší čas na reakci. Tyto aplikace také umožňují informovat řidiče předem například o blížící se zatáčce společně s informacemi, jakou rychlostí je zatáčku možné bezpečně projet a jaká je kvalita povrchu v zatáčce. Poslední, třetí skupinou bezpečnostních aplikací jsou aplikace varující řidiče před nenadálou událostí. Mezi taková varování patří upozornění na blížící se vozidlo integrovaného záchranného systému nebo upozornění na havarované vozidlo či vozidlo s technickými problémy, ke kterému se upozorňovaný řidič blíží.

Aplikace věnující se efektivitě dopravy lze dále rozdělit na aplikace zabývající se řízením dopravy a aplikace zabývající se monitorováním dopravy. Aplikace pro řízení dopravy umožňují sledovat provoz a podle něj měnit dopravní značení v reálném čase tak, aby nedocházelo k dopravním zácpám. Naproti tomu aplikace monitorování dopravy lze využít pro odhalování přestupků nebo pro sledování stavu vozovky.

Aplikace pro zvýšení komfortu cestujících se dělí na zábavní aplikace a informativní aplikace. Obě tyto skupiny jsou založeny na přístupu k internetu. Zábavní aplikace zahrnují hraní her, které je možné hrát i s cestujícími v jiném vozidle nebo například poslech online hudby. Informativní aplikace umožňují řidiče informovat o okolních pamětihodnostech nebo například

o možnostech parkování v dané lokalitě, případně je možné si pomocí těchto aplikací parkovací místo rezervovat.

Obrázek 3.1 ukazuje popsané rozdělení ITS aplikací.



Obrázek 3.1: Rozdělení ITS aplikací. Převzato z [8].

3.2. Bezdrátový standard WAVE a síť VANET

Standard WAVE patří do rodiny standardů IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11 společně s WLAN (Wireless Local Area Network). Protože WLAN nepodporuje mobilitu, byl pro automobilové síť vyvinut standard WAVE s důrazem na vysokou spolehlivost spojení a nízké zpoždění.

Standard WAVE umožňuje datový přenos s rychlostí až 27 Mb/s v dosahu 1 km a je založen na standardech IEEE 802.11p a IEEE 1609.x, kterým je přiděleno frekvenční pásmo 5,850 – 5,925 GHz [8]. Standard WAVE podporuje dva protokoly a to internetový protokol IPv6 (Internet Protocol version 6) a protokol WSMP (WAVE Short-Message Protocol). Protokol WSMP je podporován kvůli požadavkům WAVE na spolehlivost spojení a malé zpoždění. Toto je WSMP umožněno pomocí posílání krátkých zpráv a řízení rádiových prostředků. Naopak podporu

tradičních internetových aplikací včetně protokolů TCP (Transmission Control Protocol) a UDP (User Datagram Protocol) umožňuje protokol IPv6.

Protože hlavním cílem WAVE je zdokonalování bezdrátového přístupu v automobilových sítích, musí podporovat oproti ostatním standardům IEEE 802.11 [9]:

- Bezdrátový dosah až do 1000 m
- Vysokou rychlost automobilů
- Prostředí se značným počtem cest
- Mnohočetně se překrývající ad hoc sítě s vysokou kvalitou služeb QoS (Quality of Service)
- Specifický charakter aplikací

Infrastrukturní část WAVE tvoří základnové stanice RSU (Road Side Unit), které jsou pevnými vysílači tohoto standardu. Stanice RSU mohou být umístěny ve stožárech pouličního osvětlení, stožárech semaforů, sloupech dopravního značení a podobně. Pohyblivými vysílači jsou jednotky OBU (On-Board Unit), které jsou instalovány do vozidel a jsou uzpůsobeny tomu, aby fungovaly bez problémů při pohybu vozidla. Samotné jednotky OBU nebo společně se stanicemi RSU mohou tvořit WBSS (WAVE Basic Service Set), což jsou malé sítě v rámci WAVE. Členové WBSS spolu mohou komunikovat jedním odděleným kanálem a s ostatními OBU komunikují nepřímo přes jinou OBU, která za tímto účelem založí další WBSS.

Sítě VANET jsou ad-hoc sítě využívají ke komunikaci standard WAVE. V síti VANET vystupují pohybující se vozidla vybavená jednotkami OBU jako pohyblivé síťové uzly a jednotky RSU jako fixní body sítě.

Tyto sítě jsou označeny jako Ad-Hoc, protože díky pohybu vozidel, tedy pohybu jednotek OBU, se jejich struktura neustále a velmi výrazně mění. S tím přichází i požadavky na spolehlivou funkčnost sítě a malé zpoždění i v prostředí s velkým množstvím měnících se parametrů. To je zajištěno možností regulovat přenášený výkon a datovou rychlost [10].

Ačkoliv sítě VANET umožňují V2I i V2V komunikaci, v této diplomové práci bude pro jednoduchost uvažována pouze varianta V2I, tedy spojení OBU s RSU.

4. Handover

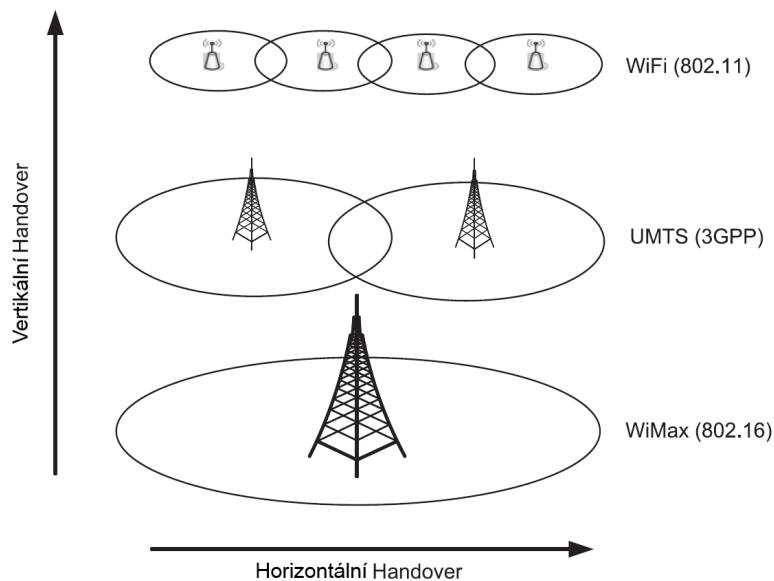
Pojem HO (Handover) označuje v telekomunikacích předání uživatelského zařízení z jedné buňky do druhé, případně předání zařízení z jedné technologie do jiné. Tato kapitola se věnuje HO a je rozdělena do dvou částí. První část se věnuje pojmům a definicím souvisejícím s HO, zatímco druhá kapitola představuje některé přístupy k rozhodování o provedení HO.

4.1. Typy handoverů

Během provádění HO, tedy přepojování UE z jedné buňky do druhé nebo předání UE z jedné technologie do jiné, je buňka, ke které je UE aktuálně připojeno, označena jako obsluhující buňka. Buňka, do které je UE předáváno, se nazývá cílová buňka.

Samotné provedení HO se skládá ze tří kroků [11] a to prozkoumávání systému, rozhodnutí o HO a provedení HO. Během první fáze systém opakovaně sbírá informace o okolních buňkách a hledá takové, které jsou schopny poskytnout vyšší kvalitu spojení nebo vyšší přenosové rychlosti a do kterých je možné UE přepojit. Rozhodnutí o HO je proces, během kterého jsou vyhodnoceny informace nasbírané v předchozím kroku. Výstupem této fáze je nalezení nové cílové buňky, do které bude UE přepojeno nebo je rozhodnuto, že UE zůstane v aktuální buňce, pokud v blízkosti neexistuje vhodnější buňka, do které by bylo UE přepojeno. Fáze provedení HO následuje po výběru nové cílové buňky a jejím vyhodnocení jako nejvhodnějšího kandidáta na to, být obsluhující buňkou. Ve fázi provedení HO si obsluhující buňka vymění signalizační zprávy s cílovou buňkou a UE je přepojeno do cílové buňky.

Z hlediska typu mobilní sítě je možné HO rozdělit na dva typy a to horizontální HO a vertikální HO. V případě horizontálního HO je předáno spojení UE mezi dvěma buňkami využívajícími stejnou technologii. Oproti tomu vertikální HO označuje předání spojení UE mezi dvěma různými technologiemi v takzvané heterogenní síti, tedy v síti složené ze dvou nebo více technologií. Obrázek 4.1 ukazuje vertikální a horizontální HO.



Obrázek 4.1: Znárodnění horizontálního a vertikálního HO. Převzato z [11].

Dalším možným dělením typů HO je rozdělení z hlediska provádění samotného HO na soft a hard HO [12]. Při hard HO obsluhující buňka přerušuje spojení s UE předtím než s UE naváže spojení cílová buňka. Tento typ HO se označuje často také jako break-before-make, tedy rozpojení před spojením. Tímto rozpojením je způsobeno zpoždění v komunikaci a krátké výpadky služby. Oproti tomu soft HO umožňuje navázání spojení s cílovou buňkou před tím, než je ukončeno spojení s obsluhující buňkou. Tento typ HO, označovaný často jako make-before-break, tedy spojení před rozpojením, je složitější na provedení, ale při jeho použití nenastávají výpadky spojení.

O provedení HO je možné rozhodnout na základě hodnot řady parametrů nebo na základě kombinací jejich hodnot. Níže jsou uvedeny nejvíce rozšířené z nich podle [13]:

- *RSS* (Received Signal Strength) je nejčastěji používaný parametr. *RSS* odpovídá přijatému výkonu referenčního nebo pilotního signálu konkrétní buňky.
- *RIP* (Received Interference Power) odpovídá celkovému přijatému výkonu od buněk nebo uživatelů v blízkém okolí.
- *RSQ* (Received Signal Quality) odpovídá poměru *RSS* cílové buňky k celkové hodnotě *RIP* měřené na UE. *RSQ* se často využívá pro odhad *SINR* (Signal to Interference plus Noise Ratio) – odstup signálu a šumu s rušením.

- *CINR* (Carrier to Interference-plus-Noise Ratio) je ekvivalentem SINR pro modulovaný signál.
- *UE rychlost* je rychlost pohybu UE v rámci buňky.
- *Účinnost-energie* obsahuje parametry: energie baterie UE, střední přenesený výkon UE a spotřebovaný výkon UE.
- *Ztráty na cestě* obsahují absorpční a difrakční ztráty a ztráty šířením.
- *RS* (Reference Signal) přenesený výkon odpovídající výkonu buňky přeneseného referenčním signálem.
- *Druh provozu* se dělí, buď na provoz v reálném čase a provoz na pozadí, nebo na hlasový/obrazový a datový provoz.
- *Šířka pásma k dispozici* je měřítkem dostupnosti zdrojů v cílové buňce nebo jejího zatížení či její kapacity.
- *Doba pobytu UE* je očekávaná doba, kterou stráví konkrétní UE v rámci konkrétní buňky.

Nejběžnějším typem HO je HO na základě porovnání hodnot CINR obsluhující stanice s předdefinovanou úrovní nebo s úrovní CINR sousední stanice.

Při HO s předdefinovanou úrovní obsluhující stanice je porovnán CINR obsluhující buňky s předdefinovanou úrovní ω a HO je proveden při splnění podmínky vyjádřené rovnicí (1).

$$\omega > CINR_o \quad (1)$$

kde $CINR_o$ je CINR obsluhující stanice a ω je předdefinovaná hodnota CINR pro provedení HO. Tento HO je zahájen pouze v případě, že hodnota CINR obsluhující stanice poklesne pod předdefinovanou hodnotu ω . Tato hodnota je však dostatečně vysoká na to, aby bylo možné provést HO bez znatelného přerušování spojení. Nejedná se tedy o prahovou hodnotu CINR, pod jejíž úrovní by již nebylo možné spojení.

Druhým základním typem je HO s hysterezí, který porovnává hodnoty CINR obsluhující a cílové stanice. Tento HO je proveden v případě, pokud je splněna podmínka v rovnici (2)

$$CINR_o + \delta < CINR_c \quad (2)$$

kde $CINR_C$ je CINR cílové stanice a δ je úroveň hystereze. Hystereze je hodnota, která je využívána k zamezení několikanásobně opakovaného provedení HO na rozhraní dvou buněk sítě, takzvaného ping-pong efektu.

4.2. Rozhodovací algoritmy pro provedení handoveru

V této kapitole jsou představeny vybrané přístupy k provádění HO mezi dvěma sítěmi a algoritmy s využitím predikce prezentované v literatuře a související s návrhem, který bude představen v následující kapitole.

4.2.1. Vertikální HO s preferovanou sítí (ALIVE-HO)

V [14] autoři popisují algoritmus označený jako ALIVE-HO pro HO mezi sítí 3G a WLAN sítí. Ve svém algoritmu využívají kombinaci měření RSS 3G sítě s následným odhadem doby pobytu UE v dané buňce a šířku pásma dané WLAN sítě, která je k dispozici.

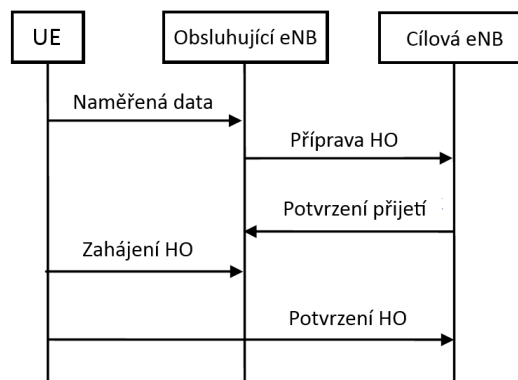
ALIVE-HO pracuje se dvěma scénáři: pohyb ven z preferované sítě (MO – Moving Out) a pohyb do preferované sítě (MI – Moving In). Preferovanou sítí je zde síť WLAN. Když se UE pohybuje z WLAN do buňky 3G sítě, HO je aktivován, pokud je průměrná hodnota RSS nižší než předdefinovaná úroveň MOT (MO Threshold) a zároveň odhadovaná doba pobytu UE v buňce WLAN sítě je menší než zpoždění HO. Druhý scénář představuje případ, kdy se UE pohybuje z buňky 3G sítě do sítě WLAN. V tomto případě je HO aktivován, pokud je průměrná hodnota RSS vyšší než předdefinovaná úroveň MIT (MI Threshold) a pokud je dostupná šířka pásma WLAN sítě dostačující pro danou aplikaci.

Výhody využívání ALIVE-HO jsou především redukce počtu zbytečných HO, protože ALIVE-HO se přizpůsobuje požadavkům aplikace a pohyblivosti uživatele [15]. Simulace provedená v [14] také ukazuje dosažené výsledky ve zlepšení dostupné šířky pásma při využívání ALIVE-HO. Z tohoto pohledu dochází ke zbytečným HO pouze na hraně WLAN sítě. Simulace také ukazuje, že pravděpodobnost zpoždění paketů může být mnohem vyšší než při použití tradičních algoritmů s hysterezí. Toto je velmi ovlivněno definovaným parametrem ASST (Application Signal Strength Threshold), který je potřeba nastavit na správnou hodnotu, protože vyšší hodnoty pravděpodobnosti zpoždění paketů jsou neakceptovatelné pro aplikace pracující v reálném čase.

Nevýhodou ALIVE-HO je problém se zpožděním paketů v případě nevhodného nastavení ASST. Další nevýhodou je snížení využívání preferované sítě, tedy WLAN, kvůli upřednostnění redukce počtu zbytečných HO.

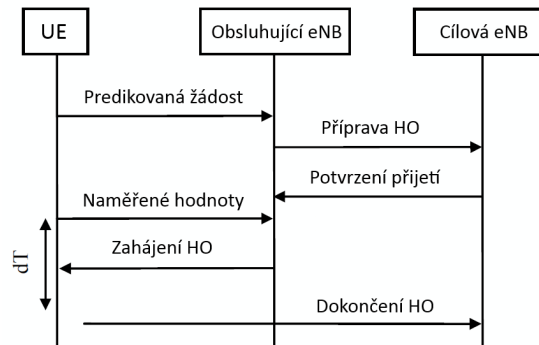
4.2.2. Přístup a (PAHA)

V [17] je představen rozhodovací algoritmus využívající polohu UE s názvem PAHA. Algoritmus je zaměřen na snížení zpoždění během HO, čehož je dosaženo úsporou času pomocí predikce cílové buňky. Standardní HO v síti LTE-A je zahájen, když obsluhující buňka pošle přípravnou zprávu cílové buňce na základě naměřených hodnot získaných od UE. Cílová buňka pošle zpět souhlasnou zprávu a následně je zahájen HO z obsluhující buňky do buňky cílové. Obrázek 4.2 ukazuje proces zahájení HO sítě LTE-A.



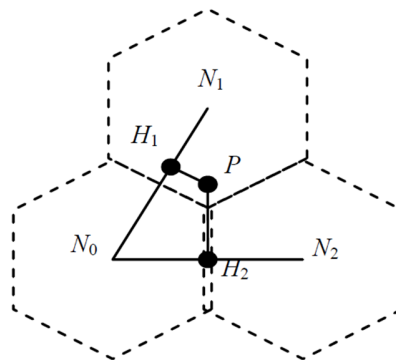
Obrázek 4.2: Proces HO sítě LTE-A. Převzato z [17].

PAHA využívá polohu UE k odhadování vzdálenosti mezi UE a obsluhující buňkou. Když vzdálenost vzroste nad definovanou hodnotu, UE odešle obsluhující buňce žádost o přípravu HO. Obsluhující buňka následně odhadne potenciální cílovou buňku a tím je zahájen HO ještě předtím, než UE pošle obsluhující buňce zprávu s naměřenými hodnotami. Obrázek 4.3 zobrazuje proces zahájení HO algoritmu PAHA. Pokud je cílová buňka odhadnuta správně, je tímto postupem ušetřen přípravný čas 60 ms [17] a zpoždění HO je zredukováno do času dT , jak ukazuje obrázek. V případě, když je cílová buňka odhadnuta špatně, je proveden standardní HO sítě LTE-A a zpoždění HO není nijak negativně ovlivněno.



Obrázek 4.3: Proces HO algoritmu PAHA. Převzato z [17].

PAHA odhaduje cílovou buňku tak, že spočítá vzdálenosti N_1H_1 a N_2H_2 pro buňky sousedící s obsluhující buňkou. Jako cílová buňka je zvolena buňka s nejkratší vzdáleností N_iH_i . Obrázek 4.4 ukazuje tento princip.



Obrázek 4.4: Odhad cílové buňky. Převzato z [17].

Výsledky simulací v [17] ukazují, že PAHA vykazuje lepší výsledky pro hodnotu zpoždění než standardní HO proces LTE-A sítě.

PAHA však odhaduje cílovou buňku pouze ze vzdálenosti UE od ní a neuvažuje tedy, že kvalita signálu není závislá pouze na vzdálenosti od vysílače, ale například i na interferencích s ostatními vysílači. Tím je predikce velmi nepřesná.

4.2.3. Přístup B (PAHB)

PAHB je zaměřen na snížení frekvence provádění HO a snížení chybovosti HO pomocí využití polohy UE. PAHB odhaduje cílovou buňku pomocí výpočtu ztrát šířením signálu, které porovnává se vzorem antény s třísektorovými vysílači eNB.

Výsledky v [17] ukazují, že PAHB výrazně snižují počet HO. Pokud je hodnota TTT (Time To Trigger) velká, PAHB přináší lepší výsledky chybovosti HO než když je hodnota TTT malá, ale i tehdy PAHB vykazuje menší chybovost HO než standardní procedura HO LTE-A sítě.

Nevýhodou PAHB je však nepřesný odhad díky využívání výpočtu ztrát dle modelu šíření, který se obvykle využívá v simulačních modelech, tím pádem plně neodpovídá realitě a může vést k chybně vybrané cílové buňce.

4.3. Srovnání popsaných algoritmů

Pro účely HO mezi sítěmi VANET a LTE-A se jeví jako nejvhodnější řešení využít kombinaci zmíněných rozhodovacích algoritmů. Tabulka 4.1 ukazuje srovnání představených rozhodovacích algoritmů z hlediska typu, jejich cíle a základního principu včetně výhod a nevýhod.

Co se týče jednotlivých návrhů, z algoritmu ALIVE-HO lze využít princip preferované sítě. Preferovanou sítí bude v případě této práce síť VANET tak, aby bylo možné snížit vytížení sítě LTE-A. V případě návrhů PAHA a PAHB lze využít princip vycházející ze znalosti polohy UE a také z predikce cílové buňky.

Tabulka 4.1: Představené rozhodovací algoritmy HO.

Typ	Cíl	Základní princip	Výhody	Nevýhody	
ALIVE-HO	VHO	Nízký počet zbytečných HO	Porovnávání RSS	Redukce zbytečných HO, uvolnění frekvenčního pásma	Bez predikce, využití WLAN není maximální
PAHA	HHO	Nízké zpoždění HO	S pomocí polohy UE	Snížení zpoždění HO	Bez preference sítě, hrubá predikce HO
PAHB	HHO	Nízký počet zbytečných HO a nízká chybovost HO	Zohlednění interferencí a s pomocí polohy UE	Redukce zbytečných HO, nízká chybovost HO	

5. Navržená predikce handoveru mezi sítěmi VANET a LTE-A

Při pohybu uživatele v mobilní síti tvořené pouze jednou technologií dochází pouze k horizontálnímu HO mezi jednotlivými základnovými stanicemi eNB. Avšak v případě heterogenní mobilní sítě složené z více technologií dochází nejen k horizontálním, ale i k vertikálním HO mezi oběma sítěmi. V případě této práce je heterogenní síť tvořena mobilní sítí LTE-A a ad-hoc sítěmi VANET.

Z důvodu stoupajících nároků na mobilní sítě je třeba hledat řešení, jak tyto sítě odlehčit. V případě uživatelů ve vozidlech a o samotná vozidla připojená k internetu, je možné využít sítí VANET. Ačkoliv síť VANET slouží primárně pro sdílení informací týkajících se bezpečnosti provozu, část její kapacity může být využita pro výměnu uživatelských dat [18]. Z pohledu uživatele přináší využití sítí VANET výhodu především v ceně za připojení. Služby mobilní sítě jsou operátorem zpoplatněny a datové tarify omezeny limitem FUP (Fair User Policy). Oproti tomu využívání služeb sítí VANET je bez poplatku. Proto je, jak z hlediska mobilního operátora, tak z pohledu uživatele, výhodné maximalizovat využití času stráveného v připojení k síti VANET.

Hlavním problémem maximalizace času v síti VANET a omezení výpadků je správné určení okamžiků, kdy provést vertikální HO do/ze sítě VANET. Pro správné určení rozhodujícího okamžiku je tak třeba definovat tři základní parametry. Těmito parametry jsou prahová hodnota sítě VANET, mapa úrovní signálů a predikce pohybu uživatele. Tyto parametry a jejich vliv bude vysvětlen v následujících podkapitolách.

5.1. Rozhodnutí o handoveru a prahová hodnota sítě VANET

Prvním z rozhodujících parametrů je prahová hodnota CINR sítě VANET označená jako Ω . Jedná se o úroveň CINR obsluhující stanice RSU, pod jejíž hodnotou již není schopna síť VANET poskytnout dostatečnou kvalitu spojení, není tak možné přenášet data a dochází k rozpadu spojení. Prahová hodnota Ω je tak hraniční (minimální) hodnotou ω v případě HO s předdefinovanou úrovní CINR. Prahová hodnota Ω je využita pouze v případě vertikálního HO mezi sítěmi LTE-A a VANET. Zatímco vertikální HO mezi sítěmi je upraven pro co největší využití sítí VANET, v případě horizontálního HO ať už v síti LTE-A nebo mezi sítěmi VANET využívá navržený algoritmus konvenční metodu HO s hysterezí.

Pro maximalizaci času stráveného uživatelem v připojení k síti VANET je pro rozhodovací algoritmus sítě VANET preferovaná použitím upraveného HO s předdefinovanou úrovní CINR. Díky tomu, že je vertikální HO do sítě VANET a ze sítě VANET prováděn pouze na základě absolutní hodnoty úrovně signálu CINR sítě VANET a prahové hodnoty CINR sítě VANET Ω a nikoliv na základě porovnání úrovní signálů LTE-A a VANET, úroveň signálu LTE-A není při provádění vertikálního HO v navrženém algoritmu zohledněna. To umožní připojení k síti VANET i v případě, že úroveň signálu sítě LTE-A je vyšší než úroveň signálu sítě VANET. Uživatel je tak připojen po celou dobu, kdy je úroveň CINR sítě VANET vyšší než Ω . Tato podmínka pro zajištění dostatečné kvality sítě VANET je vyjádřena v rovnici (3).

$$\Omega < CINR_V \quad (3)$$

kde $CINR_V$ je CINR sítě VANET. Navržený algoritmus počítá s inicializací HO do sítě VANET ihned v okamžiku, kdy je zjištěna úroveň signálu sítě VANET vyšší než je tato prahová hodnota Ω . Naopak HO ze sítě VANET je prováděn až ve chvíli, kdy dojde k poklesu kvality signálu RSU pod prahovou úroveň Ω . Avšak zde nastávají problémy s rychlostí stanovení úrovně signálu VANET a především s dobou trvání samotného provedení HO. Oba tyto aspekty vedou ke zpoždění dokončení samotného HO.

Přestože by byl vertikální HO zahájen ihned v okamžiku detekce dostatečné/nedostatečné úrovně signálu RSU, dokončení HO není okamžité a dochází tím ke zpoždění. V tuto chvíli může dojít ke dvěma možným případům v závislosti na směru vertikálního HO ze sítě VANET do LTE-A, nebo naopak. V prvním případě, při HO ze sítě LTE-A do sítě VANET dojde zpožděním HO k neefektivnímu využívání sítě LTE-A. Neefektivním využitím sítě LTE-A se rozumí takový časový interval, během kterého je některá z okolních RSU schopna obsloužit uživatele a odlehčit tak mobilní síť, ale uživatel přesto zůstává připojen k síti LTE-A.

Ve druhém případě, při HO ze sítě VANET do sítě LTE-A, však způsobuje toto zpoždění zásadní problém. Tím je rozpad spojení, protože k inicializaci HO dochází až ve chvíli, kdy je úroveň kvality spojení nedostatečná a není možné zajistit přenos dat. Uživatel se tak po celou dobu provádění HO nachází pod prahovou úrovní Ω a není tak připojen do žádné ze sítí.

Obě tyto doby tak vedou ke snížení využití sítě VANET a ve druhém případě dokonce k nemožnosti přenosu dat, což uživatel pocítí snížením QoS. K omezení negativních aspektů je proto třeba přesně určit okamžik vhodný k provedení HO. Pro tento účel slouží mapa úrovní signálů a predikce pohybu vozidla popsaná v následujících podkapitolách.

5.2. Mapa úrovně signálů

K tomu, aby mohlo být odhadnuto místo provedení HO mezi oběma sítěmi, je třeba znát úroveň signálu VANET v daném místě. Úroveň signálu na dané pozici je možné změřit až v okamžiku, kdy se vozidlo na daném místě nachází. K určení úrovně signálu s předstihem lze však využít mapu úrovní signálů označovaných jako otisky (anglicky fingerprints) [19].

Tato mapa obsahuje úrovně signálů okolních RSU přiřazené k jednotlivým souřadnicím na mapě. V jednotlivých bodech jsou úrovně signálu měřeny vozidly, která danými místy projela v minulosti. Pro každý bod jsou úrovně signálu dlouhodobě průměrovány s využitím váhování, přičemž novější hodnoty mají v průměrování vyšší váhu. Optimalizací těchto měřících průjezdů, které umožňuje LTE Release 11, se zabývá například [20]. Mapa úrovní signálů pak může být tvořena například podle [19], tedy kombinací hodnot opatřených pomocí náhodných měření UE za tímto účelem nebo pomocí hodnot, které UE měří pro svůj standardní chod. V druhém případě není třeba provádět žádná měření nad rámec standardních měření úrovní signálů potřebných pro správnou funkci sítě. Při znalosti polohy je tak možné určit úroveň signálu.

Tohoto postupu může být využito i naopak, kdy při znalosti úrovně signálů okolních stanic včetně jejich identifikačních údajů je možné určit přibližnou polohu uživatele. Každé geografické poloze totiž odpovídá konkrétní jedinečné uspořádání RSS jednotlivých signálů společně s identifikátory buněk sítě. Odhadům polohy na základě otisků se zabývá například [21].

Avšak pouhá znalost prahové úrovně CINR sítě VANET Ω a znalost mapy úrovně signálů nestačí ke správnému provedení HO. Pro jeho včasné provedení je třeba zahájit HO s předstihem. K tomu je třeba provést predikci pohybu uživatele.

5.3. Predikce pohybu

Díky otiskům je předem známa geografická poloha místa, kde poklesne hodnota obsluhující stanice RSU pod prahovou hodnotu Ω . Protože však doba provedení samotného HO

není nulová, pro provedení HO bez výpadku služby je nutné znát předem i čas, kdy uživatel dorazí na toto místo tak, aby bylo možné zahájit HO s dostatečným předstihem. Dostatečný předstih lze stanovit z predikce pohybu, při které je odhadována budoucí poloha uživatele na základě jeho předchozího pohybu.

K predikci pohybu je mnoho možností přístupu. V [22] je představena jedna z technik pro predikci polohy vozidla v síti VANET. Prezentovaná predikční technika LPVN (Location Prediction of Vehicular Networks) vychází ze znalosti současné a minulé polohy vozidla a jeho průměrné rychlosti. Podle těchto známých parametrů je odhadnuta vzdálenost budoucí polohy vozidla od současné a s využitím digitální mapy je odhadnuta budoucí poloha vozidla. K odhadu budoucího pohybu na křižovatce je využita znalost jízdního pruhu, ve kterém se vozidlo před křižovatkou pohybuje.

Další možný přístup k predikci pohybu vozidla v síti VANET je Dempster-Shafer Reasoning System, kterému se věnuje článek [23]. Tento systém se v každém kroku pohybu snaží nalézt a využít nejlépe odpovídající pohybový model pro predikci polohy. Na výběr jsou modely: konstantní rychlost, konstantní zrychlení, konstantní úhel zatáčení, konstantní úhel zatáčení a zrychlení. Pro rovné úseky se využívají první dva modely, pro zatáčky se využívají druhé dva pohybové modely.

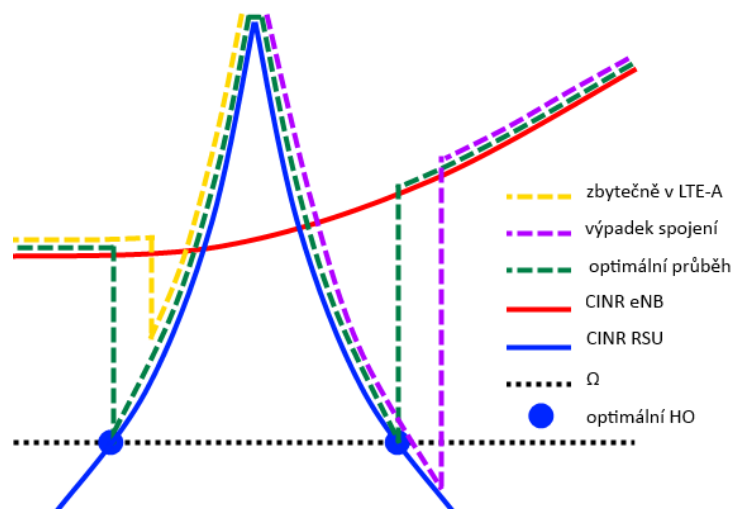
V [24] se autoři věnují predikci pohybu na základě PheroCast. Tato predikční technika vychází z chování mravenců, kteří využívají stále stejné trasy značkové pomocí feromonů. Z principu je proto odvozen i název PheroCast, kde Phero je ze slova feromony a Cast je z anglického forecast, tedy předpověď. Tento princip je přenesen i do pohybu automobilů, protože i lidé využívají některé trasy častěji než jiné. Proto tato technika vychází z mapy, která je budována podle dřívějšího pohybu uživatelů. Podle vytvořené mapy je pak prováděna predikce budoucí polohy. Trasy, po kterých se jezdí častěji, pak mají v mapě větší váhu a při predikci je odhadováno s větší pravděpodobností, že vozidlo bude v pohybu pokračovat právě touto frekventovanou trasou.

5.4. Predikce handoveru mezi sítěmi VANET a LTE-A

V navrhovaném algoritmu sloužícím k predikci HO je použita metoda odhadu pohybu a na základě lineární predikce rychlosti. Tato predikce umožňuje z několika předchozích bodů polohy odhadnout pozici vozidla v budoucnu. Díky této predikci rychlosti je možné odhadnout, v jakém okamžiku dojde k průjezdu daným místem na mapě. S využitím mapy úrovně signálů v kombinaci s predikcí pohybu je tak možné určit, jakou úroveň signálu sítě VANET bude mít uživatel k dispozici v budoucím časovém okamžiku. Při využití předchozích znalostí se známou prahovou úrovní CINR sítě VANET Ω je pak možné přesně určit okamžik, kdy je třeba zahájit provádění vertikálního HO z nebo do sítě VANET.

Obrázek 5.1 ukazuje průběhy CINR sítí LTE-A a VANET a připojení uživatele do jednotlivých sítí. Zelenou barvou je na obrázku znázorněn optimální průběh připojení k síti VANET, tedy ten, který je cílem této práce. V případě provádění vertikálního HO ze sítě LTE-A do sítě VANET je vhodným okamžikem pro provedení HO co nejkratší interval po tom, kdy úroveň CINR některé z okolních stanic RSU překročí prahovou hodnotu CINR sítě VANET Ω . Naopak v případě provádění vertikálního HO ze sítě VANET do sítě LTE-A je takovým okamžikem co nejkratší interval před tím, než úroveň CINR obsluhující RSU poklesne pod prahovou hodnotu CINR sítě VANET Ω .

Na obrázku je také naznačen standardní průběh HO s předdefinovanou úrovní CINR. Žlutou barvou je naznačen průběh, kdy je HO do sítě VANET prováděn se zpožděním, které vede ke zbytečnému zatěžování sítě LTE-A, jak je vidět z rozdílu mezi zeleným a žlutým průběhem. Naproti tomu průběh standardní HO s předdefinovanou úrovní CINR při HO ze sítě VANET je naznačen fialovou barvou. Zde je vidět, že HO je proveden až v okamžiku, kdy je úroveň CINR obsluhující RSU výrazně pod prahovou hodnotou Ω , což má za následek rozpad spojení.



Obrázek 5.1: Provádění vertikálního HO.

Díky kombinaci predikce pohybu, znalosti mapy úrovně signálů a znalosti prahové hodnoty CINR sítě VANET Ω je možné určit čas provedení HO tak, aby byl čas strávený v síti VANET co nejdelší a zároveň nedocházelo k nežádoucím výpadkům spojení. Tento princip predikce HO je základem prezentovaného návrhu a zároveň celé diplomové práce.

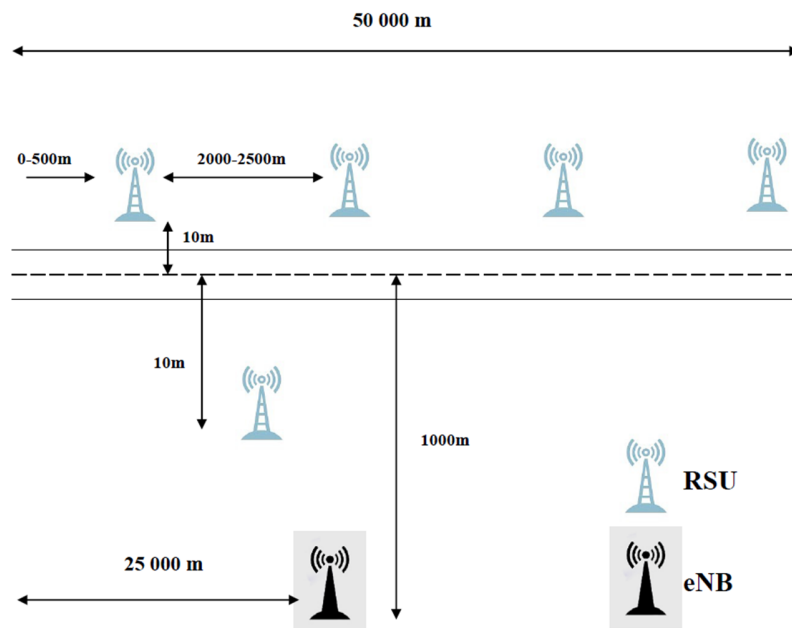
6. Navržený pohybový model

Pro simulování predikce vertikálního HO mezi sítěmi LTE-A a VANET byl vytvořen model v programu MATLAB. Simulační prostředí tvoří rovný úsek silnice, po kterém se pohybuje auto, jehož rychlost se v průběhu pohybu mění. Uživatel cestující autem může využívat služeb obou sítí, jak síť VANET, tak síť LTE-A, mezi kterými je přepojován.

Podrobnější popis vytvořeného modelu je rozdělen do pěti částí. První představuje prostředí modelu, druhá část je věnována dynamickým vlastnostem modelu, ve třetí části je popsán využívaný model šíření signálu, čtvrtá část ukazuje výpočet CINR v modelu a poslední část pojednává o provádění HO a implementaci využité predikce pohybu.

6.1. Prostředí modelu

Simulační prostředí modeluje dlouhý rovný úsek silnice směřující od západu na východ představující zidealizovaný úsek dálnice. Délka silnice v modelu je 50 km. Celý úsek je pokryt signálem jedné základnové stanice LTE-A tak, aby byl dostupný dostatečně kvalitní signál LTE-A sítě po celou dobu jízdy. Díky tomu je možné kdykoliv provést HO do LTE-A sítě, aniž by hrozil výpadek služeb způsobený nedostatečnou úrovní signálu LTE-A sítě. Umístění eNB je v polovině délky silnice a 1 km od středu směrem na jih. Obrázek 6.1 zobrazuje prostředí modelu s jednotlivými rozměry.



Obrázek 6.1: Prostředí modelu.

Sítě VANET jsou zde reprezentovány 25 fixními stanicemi RSU, které jsou umístěny podél celé silnice. Stanice RSU jsou rozmístěny s náhodnými rozestupy pohybujícími se mezi 2 a 2,5 km, přičemž vzdálenost od středu silnice je 10 metrů směrem na jih nebo na sever. Nezápadnější stanice RSU je umístěna s odstupem 0 až 500 m od počátku silnice, aby mohlo být vozidlo připojeno k síti VANET hned od začátku simulace. Rozestupy mezi jednotlivými RSU jsou zvoleny záměrně tak, aby při pohybu po silnici docházelo k poklesu úrovně CINR obsluhující stanice RSU pod prahovou úroveň, pod kterou již síť VANET není schopna poskytovat dostatečně kvalitní spojení a je tedy nutné provést HO do sítě LTE-A. Tabulka 6.1 ukazuje výchozí hodnoty parametrů prostředí modelu, pro které je prováděna simulace.

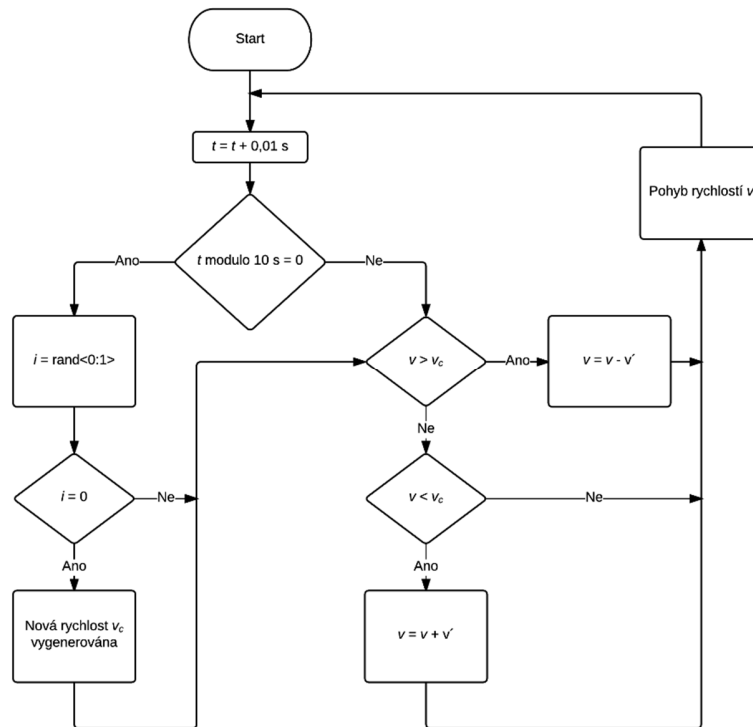
Tabulka 6.1: Výchozí hodnoty parametrů simulace.

Parametr	Výchozí hodnota
Počet stanic RSU [-]	25
Počet eNB [-]	1
Frekvence RSU [MHz]	5900
Frekvence eNB [MHz]	900
Výkon RSU [dBm]	20
Výkon eNB [dBm]	43
Prahová hodnota CINR sítě VANET - Ω [dB]	0
Doba trvání HO [s]	0,3
Průměrná rychlost [m/s]	25
Zrychlení [m/s ²]	3
Délka silnice [km]	50
Krok simulace [ms]	10

6.2. Dynamické vlastnosti modelu

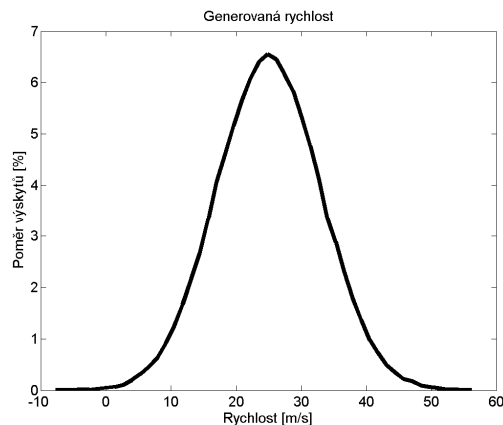
Po startu simulace se na popsaný úsek silnice vydá sledované vozidlo, které se pohybuje po celou dobu jedním směrem bez zastavení. Aby bylo možné porovnat výhody využívání predikce pohybu auta pro zlepšení efektivity HO mezi sítěmi VANET a LTE-A, bylo třeba co nejvíce přiblížit modelovaný pohyb vozidla v simulátoru skutečnému pohybu reálných vozidel. Protože simulační prostředí je tvořeno rovnou dálnicí, není možné měnit směr jízdy, je třeba upravovat dynamické vlastnosti pohybu vozidla v simulátoru.

Obrázek 6.2 ukazuje vývojový diagram stanovení okamžité rychlosti vozidla. Nejmenší časová jednotka využitá v simulaci je 0,01 s. Tedy každý krok simulace odpovídá 10 ms. Všechny další výpočty simulace se odvíjejí od této časové jednotky.



Obrázek 6.2: Vývojový diagram generování cílové rychlosti v_c . t – čas, v – okamžitá rychlost, v' – přírůstek rychlosti, i – náhodné číslo

Po každých deseti sekundách probíhá rozhodování, zda bude generována nová cílová rychlost vozidla. To znamená, pokud je $t \text{ modulo } 10 \text{ s} = 0$, je náhodně vybráno číslo 0 nebo 1. Tomu odpovídá levá větev vývojového diagramu. Pro náhodný výběr čísla je použita funkce MATLABu `randi`, která umožňuje generovat náhodná celá čísla z daného intervalu. Hodnota je generována na základě rovnoměrného rozdělení, a proto je pravděpodobnost vygenerování hodnoty 0 jako hodnoty 1 stejná. Pokud je vybráno číslo 0, následuje vygenerování nové cílové rychlosti v_c . Pravděpodobnostním rozdělením nově vygenerovaných cílových rychlostí je Gaussovo rozdělení se střední hodnotou 25 m/s a standardní odchylkou 8 m/s. Obrázek 6.3 ukazuje pravděpodobnostní rozdělení generované rychlosti.



Obrázek 6.3: Pravděpodobnostní rozdělení generované rychlosti.

Pokud je vybráno číslo 1 nebo pokud není aktuální čas simulace násobkem 10 s, pokračuje se korekcí rychlosti v , kdy je porovnávána dříve stanovená cílová rychlost v_c s okamžitou rychlostí v . Tomu odpovídá pravá větev vývojového diagramu. Pokud je $v > v_c$, je okamžitá rychlost v snížena o rychlost odpovídající zápornému zrychlení $a = -3 \text{ m/s}^2$ a časové jednotce.

V opačném případě, když je $v < v_c$, je v navýšena o rychlost odpovídající stejnému avšak kladnému zrychlení $a = 3 \text{ m/s}^2$ a časové jednotce jako v předchozím případě. Po korekci rychlosti vozidlo pokračuje dál v pohybu rychlostí v .

Úpravu rychlosti v v případě zrychlování, kde $a = 3 \text{ m/s}^2$ ukazuje rovnice (4):

$$v = v + v', \quad (4)$$

$$\text{kde } v' = a * t = 3 * 0,01 = 0,03 \text{ m/s}.$$

V případě, že se vozidlo pohybuje stejnou rychlostí jako je cílová rychlost, tedy $v = v_c$, je přeskočen krok korekce rychlosti a vozidlo rovnou pokračuje v pohybu rychlostí v . Jeden průjezd vozidla pak trvá průměrně 35 minut.

6.3. Model šíření signálu

Pro modelování šíření signálu sítě VANET i signálu sítě LTE-A byl využit model Okumura-Hata podle [25]. Model Okumura-Hata vyjadřuje ztráty šířením v dB v závislosti na frekvenci šířeného signálu, výšce antény a na prostředí, kterým je signál šířen. Model Okumura-Hata je popsán rovnicí (5).

$$PL = A + B \log(d) + C \quad (5)$$

kde d je vzdálenost mezi přijímací a vysílací anténou v km a parametry A, B, C vyjadřují závislost ztrát šířením na frekvenci signálu, výšce antény a prostředí, kterým je signál šířen. Tato závislost je vyjádřena v rovnicích (6) až (9).

$$A = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_b) - a(h_m) \quad (6)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \log(h_b) \quad (7)$$

$$a(h_m) = (1,1 \log(f) - 0,7)h_m - (1,56 \log(f) - 0,8) \quad (8)$$

$$C = 0 \quad (9)$$

kde f je frekvence šířeného signálu v MHz, h_b je výška RSU stanice nebo základnové stanice LTE-A sítě (v metrech), h_m je výška, ve které se nachází mobilní stanice (v metrech). Rovnice (8) odpovídá prostředí malého nebo středně velkého města a rovnice (9) odpovídá venkovskému prostředí. Rovnice (8) a (9) jsou z modelu Okumura-Hata vybrány tak, aby odpovídaly scénáři a prostředí modelu podle kapitoly 6.1.

Výsledné ztráty jsou pak odečteny od výkonu vysílače a tím je získána hodnota síly signálu RSSI v aktuálním bodě, kde se nachází vozidlo. V rovnici (10) je zapsán vztah pro výpočet RSSI.

$$RSSI = P_{dBm} - PL \quad (10)$$

kde P_{dBm} je výkon vysílače v dBm.

6.4. Výpočet CINR

Protože v daném scénáři simulace jsou stanice RSU rozmístěny kolem silnice s takovými rozestupy, že mezi nimi dochází k interferencím, je potřeba zohlednit vliv těchto interferencí na celkovou kvalitu signálu. Proto je v simulaci stanovována hodnota CINR zohledňující interference mezi jednotlivými vysílači včetně zohlednění šumu. Pro aktuální polohu vozidla je CINR stanoven podle rovnice (11).

$$CINR = RSSI - I \quad (11)$$

kde

$$I = 10 \log \left(N + \sum_{i=1}^6 RSSI_i \right) \quad (12)$$

V rovnici (12) jsou vyjádřeny ztráty I v dB způsobené interferencemi. $RSSI_i$ je $RSSI$ i -tého nejsilnějšího vysílače v okolí aktuální polohy vozidla v mW. Interference jsou počítány pro šest takových vysílačů. N je hladina šumu vyjádřená v mW.

Hodnoty CINR jsou využity pro vytvoření mapy úrovně signálů a to tak, že je uskutečněn měřící průjezd vozidla konstantní rychlostí 1 m/s a v každém kroku průjezdu je vypočtena hodnota CINR. Vypočtená hodnota CINR je uložena v databázi společně s geografickou polohou, pro kterou byla vypočtena. Při následných průjezdech vozidla je pak možné dopočítat z výsledné mapy úrovně signálů CINR pro aktuální polohu vozidla a využít ji společně s predikcí pohybu vozidla k predikci HO.

6.5. Provádění handoveru s využitím predikce pohybu

Během průjezdu vozidla od začátku do cílového místa dochází pouze k vertikálním HO mezi sítěmi LTE-A a VANET. Na začátku simulace je uživatel připojen k nejbližší stanici RSU. Při jízdě auta po silnici dochází ke změně úrovně CINR obsluhující stanice, která klesá s rostoucí vzdáleností od stanice a/nebo v závislosti na rostoucích interferencích v blízkosti jiné RSU. Po dobu provádění HO zůstává uživatel připojen k původní síti dokud není HO dokončen. Během provádění vertikálního HO v síti nedochází k rozpojení. V simulaci je tedy prováděn soft HO.

K eliminování výpadků spojení a zefektivnění využití sítě VANET je v simulaci využita predikce pohybu společně s otisky signálů. Pro predikci HO je v simulaci využívána lineární predikce rychlosti, která z několika předchozích bodů polohy odhadne polohu auta v budoucnosti tak, aby došlo k provedení HO ve vhodném okamžiku, definovaném v předchozí kapitole. Uživatel se pohybuje pouze po přímce, predikce tedy spočívá v odhadu vzdálenosti, kterou uživatel ve vozidle urazí v dalším kroku simulace trvajícím 10 ms. Vzdálenost, kterou vozidlo urazí v příštím kroku simulace, je odhadnuta pomocí metody nejmenších čtverců s využitím dvou nebo čtyř bodů předchozích poloh vozidla. Na základě návrhu prezentovaného v kapitole 5 je pro uživatele síť VANET preferovaná oproti LTE-A síti, proto je uživatel připojen v síti VANET, dokud je úroveň CINR

některé z okolních stanic RSU vyšší než prahová úroveň CINR sítě VANET Ω bez ohledu na úroveň CINR sítě LTE-A.

Navržený algoritmus predikce HO je porovnáván s algoritmem bez predikce. Stejně jako v případě algoritmu s predikcí je síť VANET preferovaná oproti LTE-A síti. Uživatel se proto snaží maximalizovat čas pobytu v síti VANET za použití znalosti prahové hodnoty CINR sítě VANET Ω avšak bez znalosti mapy otisků a predikce pohybu.

Algoritmy preferující síť VANET jsou porovnány s algoritmem rozhodujícím se na základě HO s hysterezí, tedy na základě porovnání hodnot CINR obou sítí. Tento algoritmus provede HO vždy, když nalezne eNB/RSU jejíž úroveň CINR bude vyšší než úroveň CINR obsluhující stanice navýšená o hysterezi 3dB (podle rovnice (2)), bez ohledu na to, zda je prováděn HO ze sítě VANET do sítě LTE-A nebo naopak.

7. Vyhodnocení návrhu

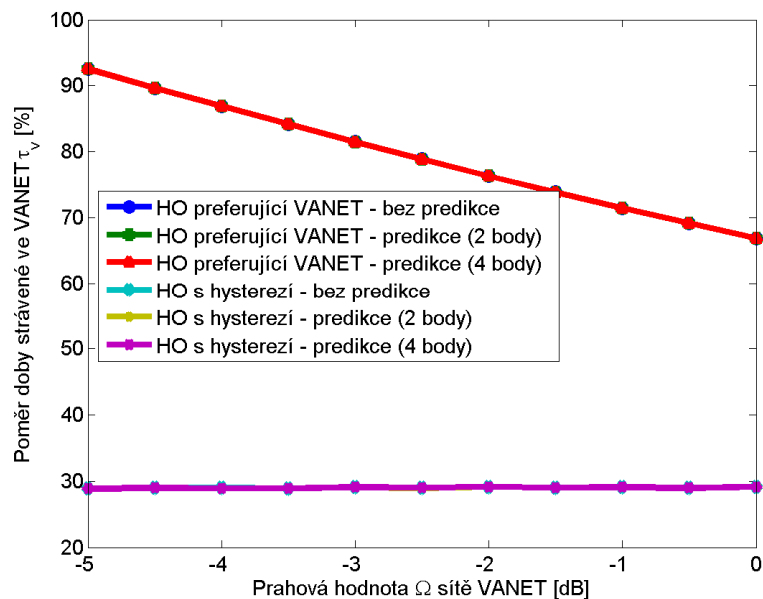
V této kapitole jsou shrnuty výsledky navrženého algoritmu predikce HO v porovnání s ostatními algoritmy. Kapitola je rozdělena do čtyř částí. První část je věnována času, který uživatel stráví v síti VANET během průjezdu po silnici, a vyhodnocování závislosti na jednotlivých parametrech simulace. Druhá část vyhodnocuje závislost doby výpadku služby na jednotlivých parametrech simulace. Třetí část představuje výsledné závislosti neúspěšných HO na jednotlivých parametrech simulace. Čtvrtá část se věnuje době zbytečně strávené v LTE-A. Všechny zmíněné výsledky jsou porovnávány především z hlediska přínosu využití predikce HO ke zlepšení efektivnosti využití sítě VANET.

7.1. Čas strávený ve VANET

Cílem navržené predikce je především snížit dobu strávenou v LTE-A a naopak maximalizovat využití připojení přes VANET. Rozhodující vliv na celkový čas strávený v jednotlivých sítích má prahová úroveň Ω , od které je možné považovat připojení přes VANET za dostatečné. Jedná se o úroveň CINR obsluhující stanice RSU, pod jejíž hodnotou již není schopna síť VANET poskytnout dostatečnou kvalitu spojení a je třeba provést HO do sítě LTE-A. Obrázek 7.1 ukazuje závislost doby strávené v síti VANET na její prahové hodnotě Ω . Algoritmy HO upřednostňující síť VANET jsou zde porovnány s algoritmem HO s hysterezí. Na svislé ose je vyneseny poměr τ_V času stráveného v síti VANET t_V k celkové době simulace t_c , jak ukazuje rovnice (13).

$$\tau_V = \frac{t_V}{t_c} \cdot 100 \% \quad (13)$$

Interval t_V je doba, kterou je projíždějící vozidlo připojeno do sítě VANET, to znamená, že je obsluhováno některou z RSU stanic. Čas t_c je celková doba trvání jednoho průjezdu silnicí. Časy t_V a t_c jsou měřeny v sekundách s přesností 0,01 s. Výsledný poměr je vyjádřen v procentech. Na vodorovné ose jsou vyneseny prahové hodnoty CINR sítě VANET Ω v dB a to od -5 do 0 dB.



Obrázek 7.1: Čas strávený v síti VANET v závislosti na její prahové hodnotě.

V grafu jsou zobrazeny tři průběhy algoritmu preferujícího VANET a tři průběhy algoritmu s hysterezí. Z grafu je patrné, že všechny algoritmy preferující síť VANET vykazují téměř shodnou lineární závislost času stráveného v síti VANET na její prahové hodnotě Ω . Zároveň ukazují, že predikce nemá vliv na celkový čas strávený v síti VANET. Tyto výsledky jsou dány tím, že čas strávený v síti VANET bez predikce je pouze posunut oproti času strávenému v síti VANET při použití predikce. Jinými slovy, HO bez predikce je proveden vždy později, což vede na jednu stranu k pozdějšímu připojení k síti VANET, ale na druhou stranu k pozdějšímu opuštění sítě VANET (jak ukazuje Obrázek 5.1). Čas v síti VANET je tak téměř totožný. Avšak, jak bude ukázáno později, jeho efektivní využití se výrazně liší.

Graf zároveň ukazuje, že pro algoritmy využívající predikci je poměr doby strávené v síti VANET až 3 krát vyšší než pro algoritmus s hysterezí. Všechny tři průběhy algoritmu s hysterezí se také překrývají, ale jsou na prahové hodnotě sítě VANET Ω nezávislé. Avšak protože HO s hysterezí vykazuje výrazně kratší časy strávené uživatelem v síti VANET, nebude již tento algoritmus porovnáván v dalších výsledcích, protože nedokáže zajistit maximalizaci využití sítě VANET a tím dostatečně odlehčit síť LTE-A.

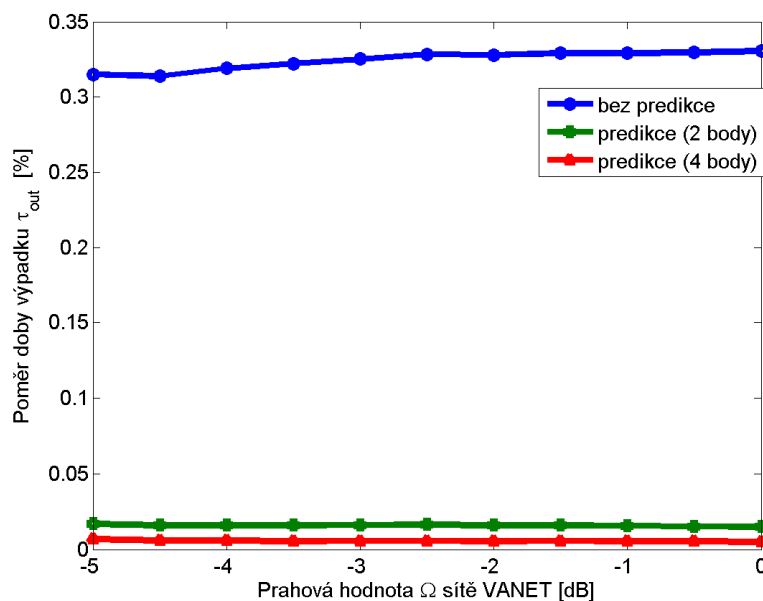
7.2. Doba výpadku spojení

K výpadku spojení dojde v okamžiku, kdy je vozidlo připojeno k síti VANET, avšak CINR obsluhující RSU poklesne pod prahovou hodnotu sítě VANET a mělo by tak dojít k HO ze sítě VANET do sítě LTE-A. Poměr doby výpadku τ_{out} je vyjádřen v rovnici (14), kde je t_{out} doba výpadku a t_c je celková doba průjezdu vozidla silnicí. Oba časy jsou měřeny v sekundách s přesností na 0,01 s.

$$\tau_{out} = \frac{t_{out}}{t_c} \cdot 100 \% \quad (14)$$

7.2.1. Závislost doby výpadku služby na prahové hodnotě sítě VANET

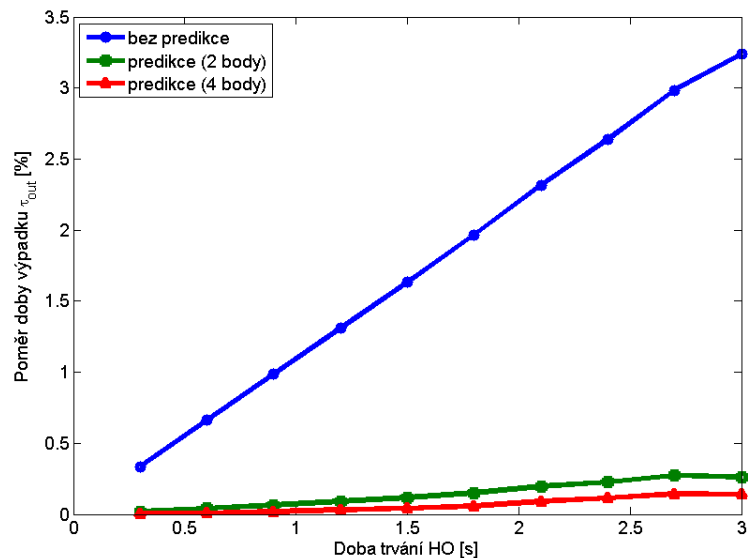
Obrázek 7.2 zobrazuje závislost poměru doby výpadku služby na prahové hodnotě sítě VANET. Z grafu vyplývá, že doba výpadku není závislá na prahové hodnotě sítě VANET. Jinými slovy, všechny průběhy v grafu jsou téměř konstantní. Prahová hodnota z pohledu výpadků pouze určuje, kdy musí být HO dokončen, aby k výpadku nedošlo. Z grafu je však patrné, že výraznou roli zde hraje navržená predikce pohybu. Modrá křivka představuje simulaci bez predikce pohybu. Tento poměr je přibližně konstantní na hodnotě 0,33 % a je přibližně čtyřnásobný v porovnání s lineární predikcí pro dva body a více než 4,5 krát vyšší než v případě predikce ze čtyř bodů. Graf jasně ukazuje, že predikce snižuje dobu výpadku spojení, protože umožňuje zahájit provádění HO s dostatečným předstihem před tím, než CINR obsluhující stanice RSU klesne pod prahovou hodnotu sítě VANET.



Obrázek 7.2: Poměr výpadku v závislosti na prahové hodnotě sítě VANET.

7.2.2. Závislost doby výpadku služby na době trvání HO

Obrázek 7.3 ukazuje dobu výpadku spojení, která je závislá také na době trvání HO mezi sítěmi LTE-A a VANET. V tomto grafu je vynesena na vodorovné ose doba provádění HO mezi sítěmi LTE-A a VANET. Tato doba je od 0,3 do 3 sekund. Na svislé ose je poměr doby výpadku vyjádřený podle rovnice (14). Doba výpadku při simulaci bez využití predikce pohybu lineárně roste od 0,35 do 3,35 % v závislosti na době HO mezi sítěmi LTE-A a VANET. i v tomto grafu je jasně vidět význam predikce pohybu. Doba výpadku pro simulace s predikcí pohybu u všech průběhů roste lineárně, a to od 0,01 % do 0,2 % pro predikci z dvou bodů až do 0,3 % pro predikci ze čtyř bodů. V porovnání s průběhem bez predikce je nárůst doby výpadku téměř zanedbatelný. Z grafu je také vidět, že použití predikce polohy vozidla snižuje závislost na době trvání HO. Použitím predikce pohybu je tedy dosaženo sedmnáctinásobného snížení doby výpadku oproti průběhům bez jejího využití pro dobu trvání HO 3 s.



Obrázek 7.3: Poměr výpadku v závislosti na době trvání HO mezi sítěmi LTE a VANET.

7.3. Neúspěšné HO

Během simulace nastávají z pohledu preferované sítě VANET dva směry HO, a to HO ze sítě VANET do LTE-A a HO ze sítě LTE-A do sítě VANET. Za neúspěšný je považován takový HO, který je proveden ze sítě VANET do sítě LTE-A, avšak není proveden včas, a než je dokončen, klesne CINR obsluhující stanice RSU pod prahovou hodnotu. V opačném případě, když je prováděn HO ze sítě LTE-A do sítě VANET, neúspěšný HO nastat nemůže, vzhledem k nastavení simulačního prostředí (viz kapitola 6.1).

Poměr neúspěšných HO označený jako Φ je vyjádřený rovnicí (15):

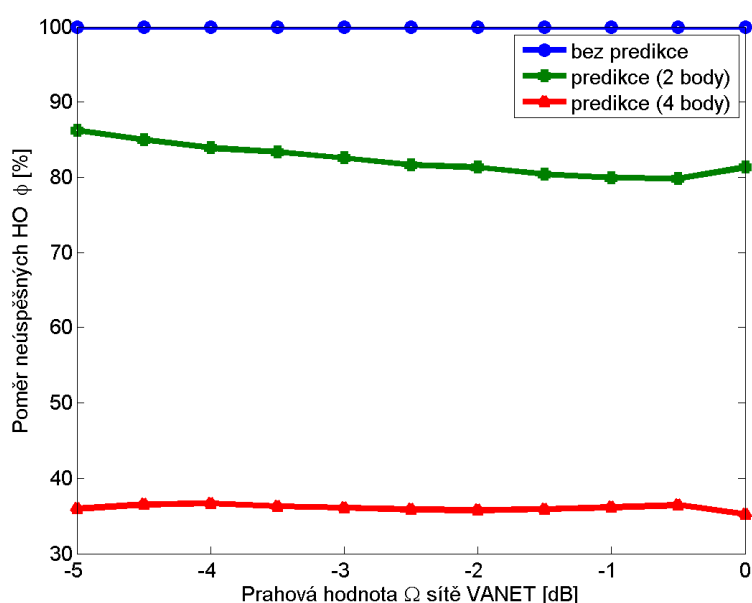
$$\phi = \frac{HO_{out}}{HO_{V-L}} \cdot 100 \% \quad (15)$$

kde HO_{V-L} je celkový počet HO z preferované sítě VANET do LTE-A a HO_{out} je počet HO ze sítě VANET do sítě LTE-A, při kterých došlo k výpadku spojení.

7.3.1. Závislost neúspěšných HO na prahové hodnotě sítě VANET

Obrázek 7.4 ukazuje závislost počtu neúspěšných HO na prahové hodnotě Ω sítě VANET, kde jsou neúspěšné HO vztaženy k celkovému počtu HO ze sítě VANET do sítě LTE-A. Poměr Φ vyjádřený rovnicí (15) je vynesena na svislé ose tohoto grafu. V grafu je vidět, že pokud není využita

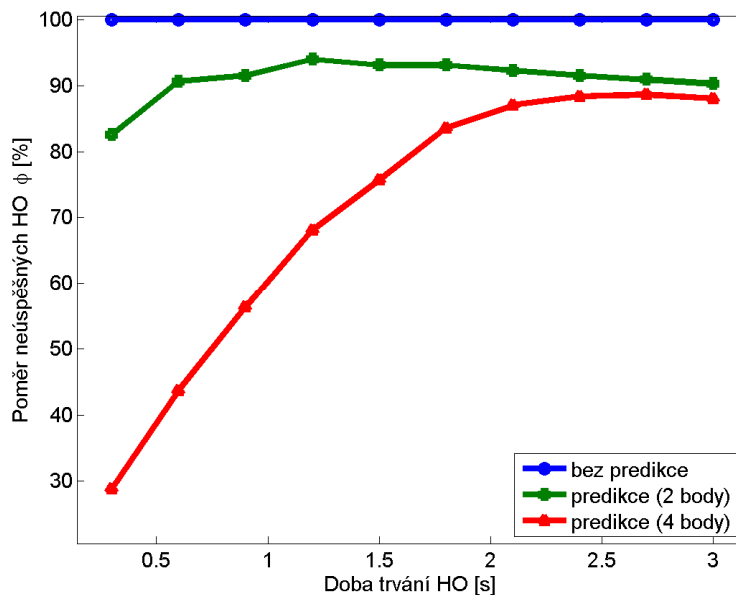
predikce, všechny HO ze sítě VANET do LTE-A jsou provedeny po poklesu signálu sítě VANET pod prahovou hodnotu Ω . K tomu dochází proto, že bez predikce může být HO zahájen, až když je detekována prahová hranice sítě VANET. Samotný HO tedy probíhá už v oblasti takové úrovně CINR, která není dostačující. Využitím predikce poměr neúspěšných HO klesá. Pro predikci z dvou předchozích bodů polohy poměr neúspěšných HO klesá na úroveň pod 85 % a pro predikci ze čtyř předchozích bodů polohy vozidla poměr neúspěšných HO klesá až na úroveň 37 %.



Obrázek 7.4: Poměr neúspěšných HO v závislosti na prahové hodnotě sítě VANET.

7.3.2. Závislost neúspěšných HO na době trvání HO

Obrázek 7.5 ukazuje závislost poměru neúspěšných HO na době trvání HO. Z grafu je vidět výrazný zisk díky predikci, který vede ke snížení poměru neúspěšných HO. Obzvláště predikce využívající 4 předešlé body polohy dosahuje pro dobu trvání HO 0,3 s poměru neúspěšných HO 29 %, což je téměř trojnásobně menší hodnota než pro stejnou dobu trvání HO vychází pro predikci využívající 2 předešlé body polohy, a téměř 3,5 krát méně než vychází pro průběh bez predikce, kde se hodnota na 100 % drží pro všechny délky HO. Graf ukazuje, že díky predikci je možné dobře odhadnout budoucí polohu vozidla na kratší čas dopředu. Proto jsou znatelně lepší výsledky v grafu pro krátké doby HO.



Obrázek 7.5: Závislost poměru neúspěšných HO na době trvání HO.

7.4. Doba zbytečně strávená v LTE-A

Podobně jako dochází k výpadku služby, když je vozidlo připojeno přes síť VANET a přitom CINR obsluhující RSU poklesne pod prahovou hodnotu Ω této sítě, není efektivní, aby bylo vozidlo připojeno k síti LTE-A, pokud CINR některé z okolních RSU je vyšší než prahová hodnota VANET a je tak možné připojit se k síti VANET s dostatečnou kvalitou. Doba, po kterou je uživatel připojen k síti LTE-A, i když nemusí, je označena jako doba zbytečně strávená v LTE-A t_z , a její poměr k celkové době průjezdu vozidla silnicí je vyjádřen v rovnici (16),

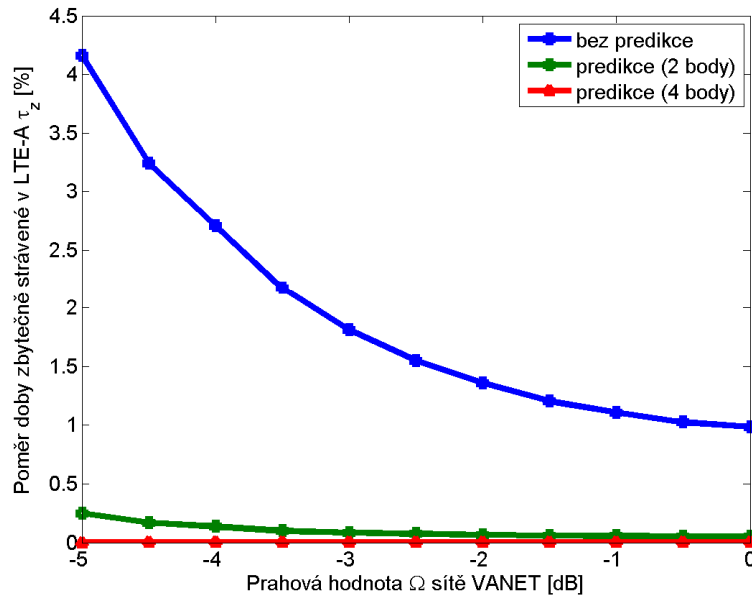
$$\tau_z = \frac{t_z}{t_L} \cdot 100 \% \quad (16)$$

kde t_z je doba zbytečně strávená v LTE-A, t_L celková doba strávená v LTE-A.

7.4.1. Závislost doby zbytečně strávené v LTE-A na prahové hodnotě sítě VANET

Obrázek 7.6 ukazuje poměr doby zbytečně strávené v síti VANET v závislosti na prahové hodnotě sítě, která je definována podle rovnice (16). Z grafu je patrné, že τ_n je závislá na prahové hodnotě sítě VANET a klesá s rostoucí prahovou hodnotou sítě přibližně logaritmicky. Graf také ukazuje, že predikce HO tuto závislost snižuje. Průběh bez predikce klesá z hodnoty $\tau_n = 4,2 \%$ při

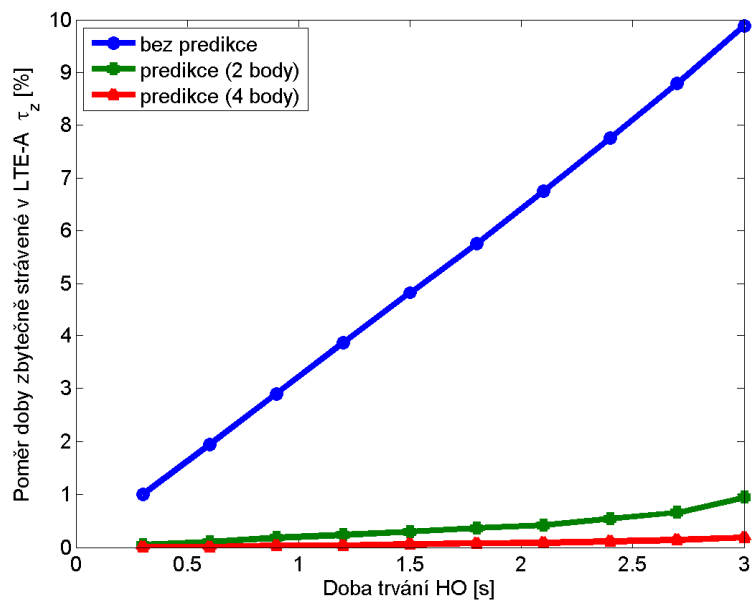
prahové hodnotě sítě VANET Ω , což je 14 krát horší hodnota než pro průběh predikce z dvou předchozích bodů, který klesá z hodnoty 0,3 %. Predikce ze čtyř předchozích bodů je konstantní a drží se téměř na nule.



Obrázek 7.6: Poměr doby zbytečně strávené v LTE-A v závislosti na prahové hodnotě sítě VANET.

7.4.2. Závislost doby zbytečně strávené v LTE-A na době trvání HO

Obrázek 7.7 ukazuje poměr doby zbytečně strávené v LTE-A v závislosti na době trvání HO vyjádřený podle rovnice (16). Z grafu je vidět podobný výsledek jako pro graf výpadku spojení jen s vyššími hodnotami. Průběh bez predikce lineárně roste od poměru 1 % pro dobu trvání HO 0,3 s až do hodnoty 10 % pro dobu trvání HO 3 s. Oproti tomu průběhy s predikcí jsou na době trvání HO téměř nezávislé. Průběh predikce ze dvou předchozích bodů mírně narůstá od 0,01 % do 1 % a průběh predikce ze čtyř předchozích bodů je téměř konstantní mezi hodnotou poměru 0,01 % a 0,1 %. Zde je opět vidět přínos predikce. Predikce zde snižuje závislost poměru doby zbytečně strávené v LTE-A na době trvání HO a pro dobu trvání HO 3 s má predikce ze čtyř předchozích bodů 100 krát nižší poměr.



Obrázek 7.7: Poměr doby zbytečně strávené v LTE-A v závislosti na době trvání HO.

8. Závěr

Tato diplomová práce se věnuje predikci handoveru mezi sítěmi VANET a LTE-A za účelem zvýšení využití sítí VANET a snížení zátěže mobilní sítě LTE-A. Toho je v navrženém algoritmu docíleno preferováním sítě VANET při rozhodování o provádění handoveru společně s využitím mapy úrovně signálů a predikcí pohybu uživatele. Na základě navrženého postupu je možné odhadnout optimální časový okamžik pro provedení handoveru tak, aby byla síť VANET maximálně využita, ale zároveň nedocházelo k výpadku spojení.

V rámci této diplomové práce byl pro ověření prezentovaného algoritmu navržen simulační model v prostředí MATLAB. Navržený model simuluje pohyb vozidla po silnici, která je pokryta signálem vysílačů RSU sítě VANET a vysílačem eNB sítě LTE-A. V simulačním modelu jsou prováděny vertikální handoveru mezi oběma sítěmi a je sledována efektivita jejich provádění.

Výsledky ukazují, že pro algoritmy preferující síť VANET je poměr doby strávené v síti VANET až trojnásobně delší v porovnání s běžným handoverem na základě hystereze. Naopak použití predikce při současné preferenci sítě VANET nemá na celkovou dobu strávenou v síti VANET vliv. Predikce podle předpokladu pouze posouvá časové okno připojení do sítě VANET do dřívějšího času. Toto posunutí má však výrazný vliv na efektivitu využití sítě VANET.

Při porovnání algoritmů preferujících síť VANET je vidět, že díky predikci pohybu je možné poměr doby výpadku spojení snížit až čtyřnásobně. Výsledky simulací dále ukazují, že navržený algoritmus je oproti algoritmu bez predikce téměř nezávislý na prahové hodnotě Ω . Z výsledků také vyplývá, že díky predikci handoveru je možné snížit poměr neúspěšných handoveru až 3,5 krát v porovnání s algoritmem bez predikce. Pro dobu zbytečně strávenou v LTE-A vykazuje využití predikce nižší hodnoty oproti jejímu nevyužití. Predikce zde také výrazně snižuje závislost doby zbytečně strávené v LTE-A na době trvání handoveru.

Výsledky práce ukazují, že i jednoduchá lineární predikce pohybu umožňuje zvýšit efektivní čas strávený v síti VANET zatímco je snížena doba výpadku spojení (počet neúspěšných handoverů) i doba zbytečně strávená v LTE-A.

Navrženou predikci handoverů je možné dále rozšířit především použitím komplexnější metody predikce pohybu nebo použitím více parametrů při rozhodování o provedení handoveru.

Použité zkratky

3GPP	Third Generation Partnership Project
AS	Access Stratum
ASST	Application Signal Strength Threshold
DFT	Discrete Fourier Transformation
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
EVDO	Evolution Data Optimized
FDD	Frequency Division Duplex
FUP	Fair User Policy
GSM	Global System for Mobile Communications
GPS	Global Position System
HHM	Handover Hysteresis Margin
HO	Handover
HSDPA/HSUPA	High Speed Downlink/Uplink Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
IPv6	Internet Protocol version 6
ITS	Intelligent Transport Systems
ITU	International Telecommunication Union
IZS	Integrovaný záchranný systém
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution – Advanced
LPVN	Location Prediction of Vehicular Networks
MI	Moving In
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MIT	MI Threshold
MO	Moving Out
MOT	MO Threshold

OBU	On-board Unit
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
QoS	Quality of Service
RSRP	Reference Signal Received Power
RSU	Roadside Unit
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
SMS	Short Message Service
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TTT	Time To Trigger
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VANET	Vehicular Ad Hoc Network
WAVE	Wireless Access in the Vehicular Environment
WBSS	WAVE Basic Service Set
WCDMA	Wideband Code Division for Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WSMP	WAVE Short-Message Protocol

Použitá literatura

- [1] Cisco, Visual Networking Index, white paper at *Cisco.com*, 2014
- [2] Recommendation ITU-R M.1645: Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000. 2003.
- [3] REPORT ITU-R M.2134: Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s). 2008.
- [4] AGILENT TECHNOLOGIES. Excerpt: LTE & LTE-A: What`s the Difference? [online]. [cit. 2014-09-16].
- [5] JAGANNATHAM, Aditya K. Advanced 3G and 4G Wireless Mobile Communications: Lecture-1-Introduction to 3G/4G Standards. In: *National Programme on Technology Enhanced Learning* [online]. 2013 [cit. 2014-09-16]. Available on: <http://nptel.ac.in/courses/117104099/1>
- [6] STURESSON, Sven-Anders. LTE Fundamentals. In: *Ericsson* [online]. [cit. 2014-09-17]. Available on: http://www.ericsson.com/ourportfolio/ericsson-academy/online-tutorials/lte_fundamentals_module/player.html
- [7] ZHANG, Xincheng a Xiaojin ZHOU. *LTE-advanced air interface technology*. Boca Raton, FL: CRC Press, c2013, xiii, 514 p. ISBN 14-665-0152-9.
- [8] DAR, Kashif, Mohamed BAKHOUYA, Jaafar GABER, Maxime WACK and Pascal LORENZ. Wireless communication technologies for ITS applications Topics in Automotive Networking. *IEEE Communications Magazine*. 2010, vol. 48, issue 5, s. 156-162. DOI: 10.1109/MCOM.2010.5458377.
- [9] UZCATEGUI, R. and G. ACOSTA-MARUM. Wave: a tutorial. *IEEE Communications Magazine*. 2009, vol. 47, issue 5, s. 126-133. DOI: 10.1109/MCOM.2009.4939288.
- [10] HARTENSTEIN, H. a K.P. LABERTEAUX. a tutorial survey on vehicular ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine*. 2008, vol. 46, issue 6, s. 164-171. DOI: 10.1109/MCOM.2008.4539481.
- [11] ZEKRI, Mariem, Badii JOUABER and Djamel ZEGHLACHE. a review on mobility management and vertical handover solutions over heterogeneous wireless networks.

- Computer Communications*. 2012, vol. 35, issue 17, s. 2055-2068. DOI: 10.1016/j.comcom.2012.07.011.
- [12] SHAYEA, Ibraheem, Mahamod ISMAIL and Rosdiadee NORDIN. Advanced handover techniques in LTE- Advanced system. *2012 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*. IEEE, 2012, s. 74-79. DOI: 10.1109/ICCCE.2012.6271155.
- [13] XENAKIS, Dionysis, Nikos PASSAS, Lazaros MERAKOS and Christos VERIKOUKIS. Mobility Management for Femtocells in LTE-Advanced: Key Aspects and Survey of Handover Decision Algorithms. *IEEE Communications Surveys*. 2014, vol. 16, issue 1, s. 64-91. DOI: 10.1109/SURV.2013.060313.00152.
- [14] ZHRAN, Ahmed H., Ben LIANG and Aladin SALEH. Signal Threshold Adaptation for Vertical Handoff in Heterogeneous Wireless Networks. *Mobile Networks and Applications*. 2006, č. 11, s. 625-640.
- [15] YAN, Xiaohuan, Y. AHMET ŞEKERCIOĞLU and Sathya NARAYANAN. a survey of vertical handover decision algorithms in Fourth Generation heterogeneous wireless networks. *Computer Networks*. 2010, vol. 54, issue 11, s. 1848-1863. DOI: 10.1016/j.comnet.2010.02.006.
- [16] LEE, Doo-Won, Gye-Tae GIL a Dong-Hoi KIM. a Cost-Based Adaptive Handover Hysteresis Scheme to Minimize the Handover Failure Rate in 3GPP LTE System. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2010, vol. 2010, issue 1, s. 750173-. DOI: 10.1155/2010/750173.
- [17] FEI, Ming a Pingzhi FAN. Position-assisted fast handover schemes for LTE-advanced network under high mobility scenarios. *Journal of Modern Transportation*. 2012, vol. 20, issue 4, s. 268-273. DOI: 10.1007/BF03325809.
- [18] HAOJIN ZHU, RONGXING LU, XUEMIN SHEN a XIAODONG LIN. Security in service-oriented vehicular networks. *IEEE Wireless Communications*. 2009, vol. 16, issue 4, s. 16-22. DOI: 10.1109/MWC.2009.5281251.
- [19] PRASAD, Athul, Olav TIRKKONEN, Petteri LUNDÉN, Osman YILMAZ, Lars DALSGAARD a Carl WIJTING. Energy-efficient inter-frequency small cell discovery techniques for LTE-

- advanced heterogeneous network deployments. *IEEE Communications Magazine*. 2013, vol. 51, issue 5, s. 72-81. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6515049.
- [20] JOHANSSON, J., W. A. HAPSARI, S. KELLEY a G. BODOG. Minimization of drive tests in 3GPP release 11. *IEEE Communications Magazine*. 2012, vol. 50, issue 11, s. 36-43. DOI: 10.1109/MCOM.2012.6353680.
- [21] LAITINEN, Heikki, Suvi JUURAKKO, Timo LAHTI, Risto KORHONEN a Jaakko LAHTENMAKI. Experimental Evaluation of Location Methods Based on Signal-Strength Measurements. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2007, vol. 56, issue 1, s. 287-296. DOI: 10.1109/TVT.2006.883785.
- [22] LIN CHEN, SHUTAO WEI a LINXIANG SHI. Research on location prediction of vehicular networks. *2009 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology*. IEEE, 2009, s. 558-561. DOI: 10.1109/ICCSIT.2009.5234484.
- [23] LYTRIVIS, P., G. THOMAIDIS, M. TSOGAS a A. AMDITIS. An Advanced Cooperative Path Prediction Algorithm for Safety Applications in Vehicular Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2011, vol. 12, issue 3, s. 669-679. DOI: 10.1109/TITS.2011.2123096.
- [24] COELHO, Paulo R., Enrique FYNN, Luis F. FAINA, Rafael PASQUINI a Lasaro CAMARGOS. Node Position Forecast in MANET with PheroCast. *2014 IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. IEEE, 2014, s. 73-80. DOI: 10.1109/AINA.2014.140.
- [25] MOLISCH, Andreas F. *Wireless communications*. 2nd ed. Chichester: John Wiley, 2011, Supplementary Material for 2nd Edition - Chapter 7 [online] [cit. 2015-04-27]. ISBN 978-0-470-74186-3.